

Ana Isabel Espinha da Silveira

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE
MODELO CINÉTICO DE COMPOSTAGEM**

Dissertação apresentada para a
obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Sanitária, na Especialidade
em Sistemas de Tratamento, pela
Universidade Nova de Lisboa,
Faculdade de Ciências e Tecnologia.

**Lisboa
1997**

Nº de arquivo:

Copyright:

Esta dissertação foi financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnológica e pela Direcção Geral do Ambiente, Projecto 88/91/J JNICT-DGQA "Influência da compostagem na degradação de substâncias tóxicas e perigosas"

Aos meus Pais
Ao António e à Joana

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Rui Ganho, pela direcção desta dissertação e discussões que contribuíram para a sua elaboração, bem como pela confiança depositada. O seu apoio foi determinante para a realização deste trabalho.

À Dr^a. Constança Sousa Dias, do Laboratório Nacional de Investigação Veterinária, pela disponibilidade e colaboração na identificação dos bolores.

Ao Paulo Ribeiro, do Departamento de Física, pela disponibilidade e colaboração na resolução de problemas eléctricos na instalação piloto de compostagem.

Ao Jonas Almeida, do Laboratório de Engenharia Bioquímica, pela ajuda no desenvolvimento do modelo cinético.

À Ana Amaro, do Instituto de Biologia Experimental e Tecnológica, pela colaboração na validação estatística do modelo.

Ao José Pedro Gaspar e à Maria José Correia, pelo auxílio na operação da instalação piloto de compostagem e na execução das análises químicas.

Aos técnicos dos laboratórios de análises químicas e microbiologia, Francisco Silva, Margarida Dias e Luísa Raimundo, pela colaboração em algumas determinações analíticas e pela preparação de meios de cultura. Uma palavra especial para a D. Augusta Parrança pela eficiência demonstrada.

À Paula Gomes, da Universidade de Aveiro, pelo envio pronto do substrato.

À Justina Catarino do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial e à Ana Pintão da Faculdade de Ciências de Lisboa, pela disponibilização da lupa com máquina fotográfica acoplada.

À Paula Sobral, pela disponibilização dos meios para a impressão da dissertação.

Aos meus colegas do Laboratório, pela cooperação e ambiente partilhado.

À Graça Martinho pelo apoio permanente durante a elaboração da dissertação.

À minha família, pela paciência e compreensão.

SUMÁRIO

A evolução da actividade dos microrganismos em compostagem está relacionada com a sucessão de populações mesofílicas e termofílicas. A avaliação do processo de compostagem é normalmente feita de uma forma global, sem ter em conta que a actividade dos microrganismos está associada com a sucessão de populações mesofílicas e termofílicas. Tentativas de relacionar a actividade às populações microbianas basearam-se em métodos de determinação que não distinguem os microrganismos viáveis dos microrganismos activos.

O presente trabalho tem por objectivo contribuir para o desenvolvimento de um modelo cinético de compostagem através da interpretação da variação da actividade dos microrganismos, expressa pela taxa de produção de CO₂, com base na sucessão de populações microbianas. Procurou-se ainda relacionar a actividade das populações com a modificação da composição do substrato, no sentido de fundamentar a hipótese da sucessão. Para a realização destes objectivos foi necessária a construção e automação de uma instalação piloto de compostagem à escala laboratorial.

O plano experimental compreendeu a realização de um conjunto de ensaios para permitir a análise do comportamento da instalação de compostagem nos regimes de temperatura fixa (25 e 40°C) e temperatura variável (25-40°C), no que diz respeito à reprodutibilidade de resultados, à evolução da temperatura, humidade, pH, composição do substrato (peso seco, sólidos voláteis, amido, hemicelulose, celulose e lenhina) e gradientes desta natureza no interior do reactor. Foram repetidos ensaios em idênticas condições para o desenvolvimento do modelo cinético de compostagem e, em simultâneo, para a observação da alteração do aspecto macroscópico do substrato. Realizaram-se ainda ensaios específicos para avaliação do comportamento do modelo cinético com a duração dos ensaios e identificação dos bolores activos.

O modelo cinético de compostagem considera que a actividade observada pode ser explicada pelo somatório do comportamento de populações individuais, cada uma com um crescimento descrito pelo modelo de Gompertz. Os parâmetros que caracterizam a actividade de cada população foram estimados através do método dos mínimos quadrados. A qualidade estatística do modelo foi avaliada através do coeficiente de determinação, r^2 , intervalos de confiança assintóticos das estimativas dos parâmetros, análise do resíduo utilizando-se ainda o teste da razão de verosimilhança para comparar soluções. Para escolha da solução relativa ao número de populações, as soluções estatísticas foram confrontadas com os

resultados da observação da alteração do aspecto macroscópico dos reactores e da modificação dos bolores activos.

Verificou-se que o modelo cinético de compostagem respondia com coerência à repetição das condições de ensaio, ao prolongamento dos ensaios, bem como a variações de temperatura. Foi possível associar a modificação da composição do substrato com a sucessão das populações.

Embora a análise do resíduo tenha permitido identificar a violação de alguns dos pressupostos associados à utilização do método dos mínimos quadrados (com consequências apenas ao nível dos testes de significância aos parâmetros), a sua utilização foi a forma encontrada para comparar a variação da actividade dos microrganismos, considerando individualmente os vários máximos em alternativa a uma análise global de uma taxa média correspondente a uma população microbiana não diferenciada. Assim, com o desenvolvimento do modelo cinético de compostagem pretendeu-se associar um significado microbiológico às singularidades da curva de evolução da taxa de produção de CO₂, no sentido de uma intervenção direccionada no processo, criando condições que favoreçam a actividade de uma ou outra população.

SUMMARY

The aim of this work was to contribute to the development of a kinetic model of composting through interpreting the variation in microorganism activity as expressed through the CO₂ production rate, based on succession of microbe populations. In addition, the populations activity were related with the substrate composition to suport the hypothesis of microbe sucession. This required the construction of a a bench-scale composting system with continuous data collection.

The experimental plan covered analysis of the behaviour of the bench-scale composting system under fixed temperatures (25°C and 40°C) and variable temperatures (25-40°C), specifically for reproduction of results, evolution of temperature, humidity, pH, substrate composition (dry weight, volatile solids, starch, hemicellulose, cellulose and lignin) and gradients inside the reactor. The trial conditions were repeated to develop the kinetic model of composting and for the observation of the macroscopic aspect of the substrate. Specific trials were also carried out to assess the behaviour of the kinetic model under differing durations and to identify the active moulds.

The kinetic model of composting considers that the activity observed can be explained by the sum of the behavior of individual populations, each of which grows according to the Gompertz model. The parameters defining the activity of each population were estimated using The Least Squares Criterion. The model's statistical quality was assessed using the coefficient of determination r^2 , confidence intervals for the parameters, residual analysis and a ratio test was used to compare solutions. The statistical solutions were compared with the results from modifications in the macroscopic aspect of the substrate and in the active moulds. After comparison, the solution was then selected.

It was shown that the kinetic model of composting provided a coherent response to repetition of trial conditions, to differing trial lengths and to temperature variations. It was possible to associate alteration in the chemical composition of the substrate with the succession of populations.

Although residual analysis showed that the statistical model has faults, it was used to compare the curves of microorganism activity, considering each peak individually as opposed to making a global analysis with an average rate corresponding to an undifferentiated microbe population. Therefore, the aim of developing the kinetic model of composting was to associate a microbiological meaning to the evolution of

the CO₂ production rate for a guided intervention in the process, thereby creating conditions that favour the activity of one or another population.

SIMBOLOGIA

Δ - variação dos resultados

A_i - produção máxima de CO_2 estimada pelo modelo para a população i

CO_{2ac} - produção acumulada de CO_2 observada

$\text{CO}_2 \text{ obs}$ - taxa de produção de CO_2 observada

$\text{CO}_2 \text{ estd}$ - taxa de produção de CO_2 estimada pelo modelo

El.i - designação do ensaio a 25°C ($i=1$ a 5)

Ell.i - designação do ensaio a 40°C ($i=1$ a 6)

EIII.i - designação do ensaio a 25-40°C ($i=1$ a 3)

$F_{\text{GLR1-GLR2GLR2}\alpha}$ - estatística do teste da razão de verosimilhança, GLR1-GLR2 e GLR2 graus de liberdade, e nível de significância α

GL- graus de liberdade

GLR- graus de liberdade associados ao resíduo

K_i - taxa máxima de produção de CO_2 estimada pelo modelo para a população i

L_i - duração da fase de latência estimada pelo modelo para a população i

$\mu_{\text{máx}}$ - taxa específica máxima de crescimento microbiano

ModCO_2 - taxa de produção de CO_2 estimada pela solução escolhida

ModCO_{2ac} - produção acumulada de CO_2 estimada pela solução escolhida

ModRA - redução de amido estimada pelo ajustamento

Mod(RA+RH) - redução de amido e hemicelulose estimada pelo ajustamento

MSQ - média da soma dos quadrados

MSQR - média da soma dos quadrados do resíduo

n - número de observações

P_i - designação da população i ($i=1$ a V)

iP - número de populações ($i=1$ a 5)

$p.\text{húmido}$ - peso húmido

r^2 - coeficiente de determinação

R_i - designação do reactor i ($i=1$ a 5)

RA - redução de amido

Razoto - redução de azoto

RC - redução de celulose

Rcarbono - redução de carbono

RH - redução de hemicelulose

RL - redução de lenhina

RPS - redução de peso seco

RQ - coeficiente de respiração

RSV - redução de sólidos voláteis

RSU - resíduos sólidos urbanos

SV - sólidos voláteis

SVB- sólidos voláteis biodegradáveis

SQ- soma dos quadrados

SQR- soma dos quadrados do resíduo

t- tempo

Tbanho- temperatura da água

Tcomando- temperatura do reactor que controla o ensaio medida no ponto de coordenadas (0,10)

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 Avaliação da eficiência do processo de compostagem.....	5
2.2 Caracterização microbiológica da compostagem.....	9
2.3 Interpretação da taxa de produção de CO ₂	13
2.4 Dinâmica de populações.....	14
2.5 Modelação da compostagem.....	17
3. PLANO EXPERIMENTAL.....	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	
4.1 Instalação piloto de compostagem	25
4.1.1 Descrição.....	25
4.1.2 Modo operativo.....	27
4.2 Substrato.....	28
4.3 Amostragem	28
4.3.1 Temperatura.....	28
4.3.2 Amostras sólidas.....	29
4.4 Métodos analíticos	30
4.5 Métodos de cálculo	31
5. RESULTADOS. APRESENTAÇÃO.....	33
6. CARACTERIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA INSTALAÇÃO PILOTO DE COMPOSTAGEM	
6.1 Objectivos	47
6.2 Análise dos resultados e discussão	47
6.2.1 Fiabilidade e reprodutibilidade	47
6.2.2 Temperatura.....	48
6.2.3 Humidade.....	50
6.2.4 pH.....	52
7. MODELO CINÉTICO DE COMPOSTAGEM	
7.1 Objectivos	55
7.2 Desenvolvimento do modelo	55
7.2.1 Estimação dos parâmetros	58
7.2.2 Avaliação da qualidade do modelo.....	59

7.2.2.1 Estatísticas de ajustamento	59
7.2.2.2 Análise do resíduo	59
7.2.2.3 Comparação de soluções	60
7.2.2.4 Avaliação biológica	60
7.2.3 Pressupostos do modelo	61
7.3 Modelação	61
7.3.1 Número de microrganismos	61
7.3.2 Número de populações	63
7.3.3 Duração dos ensaios	70
7.3.4 Efeito de temperatura	79
7.3.4.1 Ensaio a 25°C	79
7.3.4.2 Ensaio a 40°C	85
7.3.4.3 Ensaio a 25-40°C	97
7.3.4.4 Síntese	102
7.4 Discussão	107
 8. DEGRADAÇÃO DO SUBSTRATO	
8.1 Objectivos	115
8.2 Análise dos resultados e discussão	115
 9. HETEROGENEIDADE	
9.1 Objectivo	127
9.2 Análise dos resultados e discussão	127
 10. DISCUSSÃO	131
 11. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO	141
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
 ANEXOS	165
Síntese da formulação matemática de modelos de compostagem	167
Ampliação dos ajustamentos	171
"Output" do programa estatístico	185
Análise da variância	209
Degradação do substrato	217

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Sucessão de microrganismos em filme fixo	17
Figura 2.2 Modelo conceptual do processo de compostagem	22
Figura 4.1 Esquema da instalação piloto de compostagem	25
Figura 4.2 Representação do substrato em compostagem- localização dos pontos de medição de temperatura	29
Figura 4.3 Representação do substrato em compostagem- fraccionamento do substrato para recolha de amostras para a determinação de humidade e análises químicas	29
Figura 5.1 Temperatura no ensaio EI.4 (25°C)	33
Figura 5.2 Temperatura nos ensaios EII.3 e EII.5 (40°C) e ensaio EIII.3 (25- 40°C)	34
Figura 5.3 Temperatura do banho nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C	35
Figura 5.4 Temperatura nos ensaios preliminares	35
Figura 5.5 Evolução da taxa de produção de CO ₂ no ensaio EI.1 (25°C) e produção acumulada de CO ₂	36
Figura 5.6 Evolução da taxa de produção de CO ₂ nos ensaios a 25°C	36
Figura 5.7 Evolução da taxa de produção de CO ₂ nos ensaios a 40°C e 25- 40°C	37
Figura 5.8 Evolução da produção acumulada de CO ₂ nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C	37
Figura 5.9 Adição suplementar de amido (40°C)	38
Figura 5.10 Alteração do aspecto macroscópico do substrato em compostagem	44
Figura 5.11 Aspecto dos bolores identificados	46
Figura 6.1 Temperatura e evolução da taxa de produção de CO ₂ nos ensaios EII.3 e EII.5 (40°C)	49
Figura 6.2 Evolução da humidade nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C	51
Figura 6.3 Evolução do pH nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C	53
Figura 7.1 Número de microrganismos e evolução da taxa de produção de CO ₂ nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C	62
Figura 7.2 Modelo cinético de compostagem- número de populações (EI.1- 213h)	63
Figura 7.3 Modelo cinético de compostagem- número de populações (EI.2- 180h)	64
Figura 7.4 Análise de resíduos (EI.1- 213h)	65
Figura 7.5 Análise de resíduos (EI.2- 180h)	66
Figura 7.6 Valor médio dos resíduos (EI.1- 213h e EI.2- 180h)	67
Figura 7.7 Estimativas dos parâmetros (EI.1- 213h)	67

Figura 7.8 Estimativas dos parâmetros (El.2- 180h)	68
Figura 7.9 Modelo cinético de compostagem- número de populações (El.1- 450h).....	70
Figura 7.10 Modelo cinético de compostagem- número de populações (El.2- 450h).....	71
Figura 7.11 Análise de resíduos (El.1- 450h)	73
Figura 7.12 Análise de resíduos (El.2- 450h).....	74
Figura 7.13 Valor médio dos resíduos (El.1- 450h e El.2- 450h).....	75
Figura 7.14 Estimativas dos parâmetros (El.1- 450h)	75
Figura 7.15 Estimativas dos parâmetros (El.2- 450h).....	76
Figura 7.16 Dimensão das populações- soluções ótimas: El.1 (213h) três populações, El.2 (180h) quatro populações e El.1 (450h) e El.2 (450h) quatro populações	77
Figura 7.17 Dimensão das populações (El.1): outras soluções	77
Figura 7.18 Dimensão das populações (El.2): outra solução	78
Figura 7.19 Resíduos: El.1 (213h) e El.2 (180h) três populações, e El.1 (450h) e El.2 (450h) quatro populações.....	78
Figura 7.20 Modelo cinético de compostagem- ensaios a 25°C	80
Figura 7.21 Análise de resíduos- ensaios a 25°C (1ª parte)	81
Figura 7.22 Análise de resíduos- ensaios a 25°C (2ª parte)	82
Figura 7.23 Valor médio dos resíduos- ensaios a 25°C	83
Figura 7.24 Estimativas dos parâmetros- ensaios a 25°C.....	83
Figura 7.25 Dimensão das populações nos ensaios a 25°C (El.1-213h, El.2- 180h, El.3 e El.4 três populações, e El.5 quatro populações).....	84
Figura 7.26 Modelo cinético de compostagem- ensaios a 40°C	86
Figura 7.27 Análise de resíduos- ensaios a 40°C (1ª parte)	89
Figura 7.28 Análise de resíduos- ensaios a 40°C (2ª parte)	91
Figura 7.29 Valor médio dos resíduos- ensaios a 40°C	93
Figura 7.30 Estimativas dos parâmetros- ensaios a 40°C.....	94
Figura 7.31 Dimensão das populações nos ensaios a 40°C (EII.3 e EII.6 três populações, e EII.1, EII.2, EII.4, E.A e E.B quatro populações)	95
Figura 7.32 Modelo cinético de compostagem- ensaios a 25-40°C	98
Figura 7.33 Análise de resíduos- ensaios a 25-40°C (1ª parte)	99
Figura 7.34 Análise de resíduos- ensaios a 25-40°C (2ª parte)	100
Figura 7.35 Valor médio dos resíduos- ensaios a 25-40°C	100
Figura 7.36 Estimativas dos parâmetros (EIII.1).....	101
Figura 7.37 Dimensão das populações nos ensaios a 25-40°C (EIII.1 quatro populações, e EIII.2 e EIII.3 três populações).....	101
Figura 7.38 População I- Evolução da taxa de produção de CO ₂ em diferentes condições de temperatura	102

Figura 7.39 População I- Taxa máxima de produção de CO ₂ , fase de latência e produção máxima de CO ₂ em diferentes condições de temperatura	103
Figura 7.40 População II- Evolução da taxa de produção de CO ₂ em diferentes condições de temperatura	103
Figura 7.41 População II- Taxa máxima de produção de CO ₂ , fase de latência e produção máxima de CO ₂ em diferentes condições de temperatura	104
Figura 7.42 População III- Evolução da taxa de produção de CO ₂ em diferentes condições de temperatura	104
Figura 7.43 População III- Taxa máxima de produção de CO ₂ , fase de latência e produção máxima de CO ₂ em diferentes condições de temperatura	105
Figura 7.44 População IV- Evolução da taxa de produção de CO ₂ em diferentes condições de temperatura	105
Figura 7.45 População IV- Taxa máxima de produção de CO ₂ , fase de latência e produção máxima de CO ₂ em diferentes condições de temperatura	106
Figura 7.46 Produção máxima de CO ₂ - populações I e II.....	106
Figura 8.1 Composição do substrato	115
Figura 8.2 Produção acumulada de CO ₂ estimada pelo modelo de Gompertz	117
Figura 8.3 Efeito da variação inicial da temperatura na produção de CO ₂	117
Figura 8.4 Redução de substrato	118
Figura 8.5 Degradação de amido.....	119
Figura 8.6 Modelo cinético de compostagem e degradação do substrato.....	120
Figura 8.7 Degradação de hemicelulose.....	122
Figura 8.8 Composição do composto	125
Figura 9.1 Variação na concentração de amido.....	127
Figura 9.2 Diferenças de concentração de amido	130
ANEXOS.....	165
Ampliação dos ajustamentos	
Figura A.I.1 Modelo cinético de compostagem (ensaio a 25°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios.....	171
Figura A.I.2 Modelo cinético de compostagem (ensaio a 25°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios.....	174
Figura A.I.3 Modelo cinético de compostagem (ensaio a 40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios.....	177
Figura A.I.4 Modelo cinético de compostagem (ensaio a 40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios.....	180
Figura A.I.5 Modelo cinético de compostagem (ensaio a 25-40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios	183
Figura A.I.6 Modelo cinético de compostagem (ensaio a 25-40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios.....	184

Análise da variância

Figura A.II.1 Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO ₂ - ensaios a 25°C	211
Figura A.II.2 Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO ₂ - ensaios a 40°C	214
Figura A.II.3 Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO ₂ - ensaios a 25-40°C	215

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 Plano experimental.....	24
Quadro 5.1 Composição dos componentes do substrato	33
Quadro 5.2 Composição elementar	38
Quadro 5.3 Evolução do substrato	39
Quadro 5.4 Humidade em diversos locais do substrato em compostagem	40
Quadro 5.5 Sólidos voláteis em diversos locais do substrato em compostagem	41
Quadro 5.6 Amido em diversos locais do substrato em compostagem	42
Quadro 5.7 Peso relativo do substrato em compostagem	43
Quadro 5.8 Número de microrganismos.....	44
Quadro 5.9 Identificação de bolores	45
Quadro 7.1 r^2 - ensaios El.1 (213h) e El.2 (180h).....	65
Quadro 7.2 Valor da estatística do teste da razão de verossimilhança- ensaios El.1 (213h) e El.2 (180h).....	69
Quadro 7.3 r^2 - ensaios El.1 (450h) e El.2 (450h).....	72
Quadro 7.4 Valor da estatística do teste da razão de verossimilhança- ensaios El.1 (450h) e El.2 (450h).....	76
Quadro 7.5 r^2 - ensaios a 25°C.....	79
Quadro 7.6 Valor da estatística do teste da razão de verossimilhança- ensaios a 25°C	84
Quadro 7.7 r^2 - ensaios a 40°C.....	88
Quadro 7.8 Valor da estatística do teste da razão de verossimilhança- ensaios a 40°C	95
Quadro 7.9 r^2 - ensaios a 25-40°C.....	97
Quadro 8.1 r^2 na regressão linear $\text{ModRA} = a \text{ ModCO}_2\text{ac} + b$	119
Quadro 8.2 Adição de amido no início do ensaio Ell.4- Parâmetros característicos das populações	122
Quadro 8.3 r^2 na regressão linear $\text{Mod(RA+RH)} = a \text{ ModCO}_2\text{ac} + b$	123
ANEXOS.....	165
"Output" do programa estatístico	
Quadro A.I.1 Ensaio El.1 (213h) uma população	185
Quadro A.I.2 Ensaio El.1 (213h) duas populações.....	185
Quadro A.I.3 Ensaio El.1 (213h) três populações	186
Quadro A.I.4 Ensaio El.1 (213h) quatro populações	186
Quadro A.I.5 Ensaio El.2 (180h) uma população	187
Quadro A.I.6 Ensaio El.2 (180h) duas populações.....	187
Quadro A.I.7 Ensaio El.2 (180h) três populações	188
Quadro A.I.8 Ensaio El.2 (180h) quatro populações	188

Quadro A.I.9 Ensaio EI.1 (450h) uma população	189
Quadro A.I.10 Ensaio EI.1 (450h) duas populações	189
Quadro A.I.11 Ensaio EI.1 (450h) três populações	190
Quadro A.I.12 Ensaio EI.1 (450h) quatro populações	190
Quadro A.I.13 Ensaio EI.1 (450h) cinco populações	191
Quadro A.I.14 Ensaio EI.2 (450h) uma população	191
Quadro A.I.15 Ensaio EI.2 (450h) duas populações	192
Quadro A.I.16 Ensaio EI.2 (450h) três populações	192
Quadro A.I.17 Ensaio EI.2 (450h) quatro populações	193
Quadro A.I.18 Ensaio EI.3 três populações	193
Quadro A.I.19 Ensaio EI.3 quatro populações	194
Quadro A.I.20 Ensaio EI.4 três populações	194
Quadro A.I.21 Ensaio EI.4 quatro populações	195
Quadro A.I.22 Ensaio EI.5 três populações	195
Quadro A.I.23 Ensaio EI.5 quatro populações	196
Quadro A.I.24 Ensaio EII.1 três populações	196
Quadro A.I.25 Ensaio EII.1 quatro populações	197
Quadro A.I.26 Ensaio EII.2 três populações	197
Quadro A.I.27 Ensaio EII.2 quatro populações	198
Quadro A.I.28 Ensaio EII.3 três populações	198
Quadro A.I.29 Ensaio EII.3 quatro populações	199
Quadro A.I.30 Ensaio EII.4 três populações	199
Quadro A.I.31 Ensaio EII.4 quatro populações	200
Quadro A.I.32 Ensaio EII.5 três populações	200
Quadro A.I.33 Ensaio EII.5 quatro populações	201
Quadro A.I.34 Ensaio EII.6 três populações	201
Quadro A.I.35 Ensaio EII.6 quatro populações	202
Quadro A.I.36 Ensaio E.A duas populações	202
Quadro A.I.37 Ensaio E.A três populações	203
Quadro A.I.38 Ensaio E.B duas populações	203
Quadro A.I.39 Ensaio E.B três populações	204
Quadro A.I.40 Ensaio EIII.1 três populações	204
Quadro A.I.41 Ensaio EIII.1 quatro populações	205
Quadro A.I.42 Ensaio EIII.2 três populações	205
Quadro A.I.43 Ensaio EIII.2 quatro populações	206
Quadro A.I.44 Ensaio EIII.3 três populações	206
Quadro A.I.45 Ensaio EIII.3 quatro populações	207
Degradação do substrato	
Quadro A.II.1 Balanço de nutrientes	217
Quadro A.II.2 Redução do substrato	218

1. INTRODUÇÃO

A compostagem, de acordo com Haug (1993), é um processo de tratamento de resíduos orgânicos, sólidos e semi-sólidos, que compreende a decomposição biológica e a estabilização, em condições que permitem o desenvolvimento de temperaturas termofílicas como resultado do calor produzido biologicamente, para a produção de um produto final estável, isento de microrganismos patogénicos e sementes de plantas, e que pode ser aplicado, com benefício, ao solo. Bertoldi (1993) esclarece que a fase de estabilização corresponde a um processo de humificação, que pode ser impedido em condições de deficiência de oxigénio e substrato inadequado.

O autoaquecimento é o aspecto mais relevante do processo de compostagem (Finstein e Morris, 1975). A concentração de matéria orgânica degradável e as características dos resíduos, nomeadamente o facto de serem um fraco condutor térmico, são responsáveis pela conservação do calor produzido metabolicamente e consequente elevação de temperatura (Haug e Haug, 1977; 1978; Hogan *et al.*, 1989).

Os microrganismos em condições adequadas, nomeadamente de humidade e nutrientes, oxidam a matéria orgânica e libertam energia e, se a quantidade de resíduos for suficiente, verifica-se a acumulação de calor e a elevação de temperatura. O crescimento de microrganismos mesofílicos é inicialmente estimulado pelo aumento da temperatura mas, quando se atingem níveis inibidores, estas temperaturas tornam-se condição limitante. A taxa de produção de calor aumenta inicialmente, torna-se em seguida constante e, finalmente, a elevação da temperatura, provoca a sua redução. A uma população mesofílica sucede-se uma população termofílica e o ciclo repete-se (MacGregor *et al.*, 1981; Finstein *et al.*, 1983a; Finstein *et al.*, 1986a). Acima de 55-60°C, a interação entre a produção de calor e o aumento da temperatura torna-se novamente negativa (a um incremento da temperatura corresponde um decréscimo da taxa de produção de calor). Mesmo assim, a temperatura pode atingir os 80°C e o consequente arrefecimento, pelo colapso da população termofílica, é inevitável permitindo a recolonização do substrato por uma população mesofílica.

O controlo do autoaquecimento através do arejamento é uma forma de intervenção no processo de compostagem, removendo calor de modo a conservar a temperatura num intervalo favorável à actividade dos microrganismos. Finstein *et al.* (1986a) calcularam que na oxidação completa da matéria orgânica em dióxido de carbono e água são necessários 38.7kg de ar seco para remover calor e 4.31kg

1. Introdução

para fornecer oxigénio ou, de outro modo, é necessário nove vezes mais ar para remover o calor do que para fornecer o oxigénio exigido pelo processo biológico. Deste modo, o arejamento comandado pela temperatura garante condições aeróbias. No início do processo de compostagem, pretende-se fornecer oxigénio e arrefecer o mínimo pelo que, nesta fase, o controlo do arejamento através da concentração de oxigénio permite otimizar o funcionamento do processo de compostagem. A degradação de matéria orgânica e a redução de humidade são mais acentuadas quando o arejamento é controlado pela temperatura ou pela temperatura e pela concentração de oxigénio do que quando o processo é autolimitado pela produção de calor (correspondendo respectivamente à estratégia de Rutgers, à tecnologia do "Dutch tunnel" e ao processo de Beltsville) (Finstein, 1992).

Os objectivos da compostagem são a decomposição da matéria orgânica facilmente degradável (Kubocz e Gruneklee, 1995), de modo a evitar fenómenos de competição (Golueke, 1977) e de fitotoxicidade (Zucconi e Bertoldi, 1987) quando se aplica composto ao solo, e simultaneamente, tirar partido da elevação da temperatura e de antagonismos microbianos para a destruição dos microrganismos patogénicos (Miller, 1991).

Depois de uma época de grande interesse pela compostagem de resíduos sólidos urbanos (RSU), a sua aceitação decaíu, devido à qualidade do composto e à presença de metais pesados (Petruzzelli, 1996). Na gestão integrada de resíduos a prioridade atribuída à valorização, a contestação ambiental de outras soluções, nomeadamente de incineração, bem como experiências bem sucedidas com resíduos da limpeza de jardins e afins, abriram novas perspectivas à compostagem. A utilização da compostagem é favorecida pela orientação estratégica de eliminação dos aterros para resíduos brutos e da redução drástica da deposição de matéria orgânica em aterro. Alguns países da UE eliminaram os aterros para resíduos brutos, apenas utilizados para a colocação de resíduos últimos, considerando prioritária a prevenção da produção e a combinação de processos de reciclagem de materiais (Belle, 1996). É nesta óptica que a compostagem surge associada à digestão anaeróbia para uma reciclagem óptima dos resíduos orgânicos e valorização agrícola (Beffa *et al.*, 1995).

Tendo em conta a importância decisiva da qualidade da matéria-prima no produto final, actualmente só tem sentido a compostagem de resíduos orgânicos (resíduos de jardim e afins, fracção orgânica dos RSU resultante de deposição separada) não misturados com outros tipos de resíduos (Bertoldi, 1995a; Lemmes, 1996). Mesmo nestas condições, deve verificar-se com regularidade a qualidade do

composto (Vogtmann *et al.*, 1995). Muito embora não se disponha de legislação comunitária sobre a utilização de composto na agricultura (Piavaux, 1995), alguns países têm feito esforços para a definição de critérios de qualidade e para a criação de marcas individualizadas de composto (Brethouwer e Tubergen, 1995; Raninger, 1995; Ryse e Vanacker, 1995; Lemmes, 1996).

A quantidade de resíduos orgânicos produzidos anualmente na UE atinge os 2500 milhões de toneladas (Bertoldi, 1995a) e os RSU representam 8% deste universo. O potencial para a utilização de tratamentos biológicos é enorme, muito embora Bertoldi (1993) tenha frizado que o desenvolvimento da compostagem na UE depende da garantia da produção de um composto de qualidade.

De acordo com o Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos (Lobato Faria *et al.*, 1997), estas são também, em linhas gerais, as orientações para Portugal, embora, a curto prazo, seja prioritária a "limpeza" do País e os aterros para a totalidade dos resíduos tenham ainda um papel importante a desempenhar. Prevê-se, no curto e médio prazo, o reforço da valorização orgânica dos resíduos sólidos urbanos, por compostagem e/ou digestão anaeróbia, com aumento dos actuais 6% em 1997, para 15% e 25%, respectivamente nos anos 2000 e 2005.

Para além da produção de composto para a agricultura, existem alguns trabalhos que apontam a compostagem como forma de estabilização da matéria orgânica antes da sua colocação em aterros (Finstein *et al.*, 1983a; Bertoldi, 1995a; Belle, 1996; Lemmes, 1996) e ainda como forma de tratamento de resíduos perigosos, nomeadamente pesticidas e hidrocarbonetos (Crawford *et al.*, 1993; Silveira e Ganho, 1995; Lilya *et al.*, 1996; Liu e Cole, 1996).

Recentemente, Elwell *et al.* (1994) referem-se à compostagem como sendo uma "arte". Na realidade, as práticas de compostagem variam, raramente estão formalizadas ou são consistentemente aplicadas e tendem para ser empíricas, e, por isso, a natureza precisa do sistema dificulta a simulação do processo (Hogan *et al.*, 1989), o que, de certo modo, justifica que seja escassa a bibliografia sobre modelação (Hamelers, 1993). A ideia de que o processo de compostagem é abordado frequentemente sem ter em conta os fundamentos biológicos isto é, em modelos do tipo "caixa preta", foi explicitada por Finstein *et al.* (1983a) e Keener *et al.* (1993).

O presente trabalho tem por objectivo contribuir para o desenvolvimento de um modelo cinético de compostagem através da interpretação da variação da

1. Introdução

actividade dos microrganismos, expressa pela taxa de produção de CO_2 , com base na sucessão de populações microbianas. Constitui também objectivo desta dissertação a construção e automação de uma instalação piloto de compostagem à escala laboratorial, que funcione em condições isotérmicas e adiabáticas, com medição em contínuo da actividade dos microrganismos através da produção de CO_2 , com a possibilidade de acompanhamento da evolução da composição físico-química e microbiológica do substrato, sem perturbação do processo de degradação resultante da colheita de amostras em momentos intermédios, e com a hipótese de, em simultâneo, repetição das condições de ensaio para confirmação de resultados. Procurou-se ainda fundamentar a hipótese de sucessão de populações através da modificação da composição do substrato.

Assim, pretendeu-se associar um significado microbiológico às singularidades da curva de evolução da taxa de produção de CO_2 , no sentido de uma intervenção no processo de compostagem direccionada, para criar condições que favoreçam a actividade de uma ou outra população.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Avaliação da eficiência do processo de compostagem

A avaliação da eficiência da compostagem é uma questão fundamental quando se pretende seleccionar tecnologias ou melhorar procedimentos. Embora na avaliação do processo de compostagem seja difícil separar a eficiência da qualidade do composto, a análise que se segue centra-se no primeiro destes aspectos.

A eficiência é medida em termos de taxa de decomposição ou taxa de reacção, expressa em unidades $\text{MM}^{-1}\text{T}^{-1}$ (Miller e Finstein, 1985; Haug, 1996). O primeiro problema surge para referir à escala real as medições em unidades de massa, dado que obriga à pesagem dos diversos materiais envolvidos no processo de tratamento. Para resolver esta questão, os resultados devem ser expressos em relação às cinzas, que se mantêm constantes durante o processo de degradação (Stentiford e Pereira Neto, 1985; Stentiford, 1993; Adani *et al.*, 1997).

Finstein *et al.* (1983b) fizeram uma análise crítica dos métodos normalmente utilizados na avaliação da eficiência do processo de compostagem, quer no que se refere à medição da matéria orgânica, nomeadamente através dos sólidos voláteis, do carbono orgânico total e da relação carbono/azoto quer no que diz respeito à manifestação da sua degradação, nomeadamente através do decréscimo da humidade, do consumo de ar comandado pela temperatura, da evolução da temperatura, da produção de calor, do consumo de oxigénio e da produção de dióxido de carbono. As determinações de sólidos voláteis, de carbono orgânico ou da relação carbono/azoto não são específicas no sentido que não distinguem a matéria orgânica utilizada na respiração da que é incorporada na biomassa, não são sensíveis porque variam num intervalo relativamente estreito e sobretudo exigem a recolha frequente de amostras de um material heterogéneo e apoio laboratorial intensivo (Finstein *et al.*, 1983b; Stentiford, 1993). A relação carbono/azoto só reflecte o decréscimo de sólidos voláteis em processos com perdas de azoto restritas (Stentiford, 1993). Finstein *et al.* (1983b) propuseram a utilização do decréscimo da humidade ou consumo de ar comandado pela temperatura na operação diária de uma estação de compostagem. O decréscimo de humidade obriga também à colheita de amostras e, embora a sua variação seja mais sensível do que a que se apoia na determinação de sólidos voláteis, subestima a decomposição porque não distingue a água produzida metabolicamente. Miller e Finstein (1985) consideraram o decréscimo da humidade um estimador robusto da eficiência do processo, embora não meça a taxa de reacção em termos absolutos e, por exemplo, Bertoldi *et al.* (1982) usaram

este método para comparar modos distintos de arejamento na compostagem em pilhas. O significado biológico da determinação de humidade foi investigado inicialmente por Finstein e Morris (1975) e posteriormente por Miller (1989).

O consumo de ar comandado pela temperatura é uma estimativa do calor produzido, e, apesar de permitir uma intervenção imediata, é também uma medida grosseira da taxa de decomposição, dado que a capacidade do ar para remover calor depende das suas características e aumenta com a temperatura (Finstein *et al.*, 1983b).

A questão da avaliação da eficiência do processo de compostagem foi retomada posteriormente pelos mesmos autores, sem alteração das posições anteriormente referidas (Finstein *et al.*, 1986b). A utilização do arejamento comandado pela temperatura é largamente discutida por este grupo de investigação em diversas publicações (MacGregor *et al.*, 1981; Finstein *et al.*, 1983a; Miller e Finstein, 1985; Finstein *et al.*, 1986a). Os pontos onde devem ser colocados os medidores de temperatura que controlam os arejadores e a utilização de um ou mais medidores foram discutidos por Stentiford (1993) e Leton e Stentiford (1990).

O consumo de ar comandado não só pela temperatura mas também pela concentração de oxigénio para melhorar o sistema anterior na fase inicial do processo de compostagem foi entretanto proposto (Leton e Stentiford, 1990; Finstein, 1992; Finstein e Hogan, 1993). O controlo do arejamento através da concentração de oxigénio foi estudado anteriormente por Bertoldi *et al.* (1988) que propuseram a sua utilização em vez da temperatura (Bertoldi, 1995b).

A utilização do decréscimo de humidade na avaliação do processo em sistemas com arejamento comandado pela temperatura coloca problemas relacionados com o facto da humidade se tornar limitante e ser necessária a adição de água (Robinson e Stentiford, 1993). A discussão de métodos de medição da humidade em tempo real a fim de melhorar o controlo do processo de compostagem foi apresentada por Stentiford e Zane (1995) e Stentiford (1996).

Recentemente foi publicado um estudo comparativo de parâmetros para avaliar a taxa de compostagem à escala industrial (Papadimitriou e Balis, 1996). A utilização do consumo de ar comandado pela temperatura, do decréscimo da matéria orgânica (expressa através dos sólidos voláteis, da carência química de oxigénio, do carbono orgânico total, do carbono total e da relação carbono total/azoto) e ainda da actividade respiratória (consumo instantâneo de oxigénio) foi discutida em relação à tendência para a secagem que foi o método por excelência

escolhido. Estes autores concluem que o decréscimo da humidade está significativamente relacionado com o decréscimo de sólidos voláteis e a actividade respiratória, mas os resultados com a carência química de oxigénio, o carbono orgânico total, o carbono total e a relação carbono total/azoto não são interessantes. A avaliação através do consumo de ar comandado pela temperatura não foi realizada devido a problemas com o funcionamento dos arejadores.

Na prática, na ausência de uma forma directa de medir a eficiência e quando os critérios continuam em discussão (Stentiford, 1993), o processo de compostagem é avaliado, muitas vezes qualitativamente, com base num conjunto de parâmetros, nomeadamente temperatura, humidade, sólidos voláteis, actividade respiratória, consumo de ar comandado pela temperatura e também pelas características do composto, nomeadamente contaminação fecal e fitotoxicidade (Robinson e Stentiford, 1993; Razvi e Kramer, 1996; Jackson e Line, 1997). Acrescente-se ainda que a temperatura é sistematicamente usada na avaliação do processo de compostagem embora não meça a quantidade de calor produzido (Finstein *et al.*, 1983b).

A dificuldade de aplicar os métodos de avaliação do processo de compostagem à escala industrial faz com que frequentemente se realizem ensaios à escala laboratorial, apesar dos problemas relacionados com a transposição de resultados e das dificuldades de simulação (Strom *et al.*, 1983; Hogan *et al.*, 1989). Ensaios de compostagem a uma escala intermédia pretendem ultrapassar estas dificuldades e simultaneamente beneficiar das condições de laboratório (Swannell e Scholes, 1991).

Finstein *et al.* (1983b, 1986b) propuseram a utilização da taxa de produção de calor, o consumo de oxigénio ou a produção de dióxido de carbono para a avaliação do processo de compostagem no laboratório. A avaliação em contínuo dos diversos tipos de perdas de calor na compostagem à escala laboratorial não é fácil pelo que este método não é usual (Miller, 1996; Shaw e Stentiford, 1996). Efectivamente, a dificuldade na realização de ensaios de compostagem em laboratório deve-se à quantidade insuficiente de resíduo para produzir uma curva característica de temperatura. A avaliação com base em medições de oxigénio ou de dióxido de carbono permitiu passar de medições pontuais (Sikora *et al.*, 1983), para medições em contínuo (Bach *et al.*, 1984). Este último grupo de autores prefere o dióxido de carbono para medir a taxa de reacção, dado que a célula de infravermelhos é mais precisa e sensível do que a célula paramagnética usada para medir o oxigénio. A utilização de CO₂ para medir a taxa de respiração não permite, porém, diferenciar entre processos aeróbios e anaeróbios (Bertoldi 1995b;

2. Revisão Bibliográfica

Lasaridi e Stentiford, 1996) nem a actividade de bactérias autotróficas, capazes de usar o CO₂ produzido pelos microrganismos heterotróficos (Bertoldi, 1995b).

Estes métodos consideram os resíduos na totalidade, evitam a colheita de amostras e medem directamente a actividade metabólica. Acresce ainda que no laboratório é fácil expressar os resultados em unidades de massa e realizar balanços de massa.

O grupo de investigação do Tokyo Institute of Technology, utilizou sistematicamente a taxa específica de produção de CO₂ na avaliação do processo de compostagem (Bach *et al.*, 1984; Bach *et al.*, 1985; Nakasaki *et al.*, 1985a,b,c; Nakasaki *et al.*, 1986; Nakasaki e Akiyama, 1988; Kubota e Nakasaki, 1991; Nakasaki *et al.*, 1992a,b; Nakasaki *et al.*, 1994). A quantificação do processo é feita através da produção acumulada de CO₂, expressa em sólidos voláteis, através de um coeficiente médio de conversão. De qualquer modo, trata-se da quantificação global do processo e a interpretação da variação da taxa de produção de CO₂ é feita de uma forma qualitativa, recorrendo à análise da evolução de outros parâmetros, nomeadamente temperatura, número de microrganismos e pH. Namkoong e Hwang (1997) usaram directamente a produção acumulada de CO₂ para comparar ensaios de compostagem à escala laboratorial.

A medição directa da actividade à escala industrial apresenta algumas dificuldades (Kuter *et al.*, 1985; Leton e Stentiford, 1990; Papadimitriou e Balis, 1996). McKinley e Vestal (1984, 1985), McKinley *et al.* (1985a,b) usaram substratos marcados com carbono 14 (acetato, glucose, glutamato) para medir a actividade microbiana através da taxa de mineralização a CO₂ e da taxa de incorporação na fracção lipídica, e a radioactividade foi determinada com um cintilador de partículas. Derikx *et al.* (1990) para além da taxa de mineralização a CO₂ de glutamato marcado com carbono 14, utilizaram também a taxa de consumo de oxigénio.

Balis *et al.* (1995) e Lasaridi *et al.* (1996) desenvolveram um respirómetro para medir, simultaneamente a diferentes temperaturas, a biodegradabilidade de um substrato e embora os métodos respirométricos sejam normalmente usados para medir a estabilidade do composto, Papadimitriou e Balis (1996) investigaram a possibilidade da sua utilização na medição da taxa de degradação à escala industrial.

A aplicação da tecnologia do "Dutch tunnel", também designado pelo sistema ECC (environmentally controlled composting system), na compostagem da fracção orgânica dos resíduos sólidos, abriu novas perspectivas, nomeadamente porque

torna possível a monitorização à escala industrial da actividade microbiana através da determinação da variação temporal do calor produzido na degradação dos resíduos (Oorthuys *et al.*, 1995; Border *et al.*, 1996). Sinteticamente pode descrever-se o sistema ECC como um sistema fechado, de funcionamento descontínuo, com recirculação permanente do ar através do substrato em compostagem e arrefecimento num permutador de calor exterior, sempre que a temperatura excede um valor fixado (Finstein, 1992). O sistema permite, ainda, a adição de ar fresco controlada pela concentração de oxigénio. Harper *et al.* (1992) verificaram em ensaios no sistema ECC que a variação do consumo de oxigénio era semelhante à produção de calor.

2.2 Caracterização microbiológica da compostagem

Sendo a compostagem um processo essencialmente biológico é fundamental avaliar a importância que tem sido atribuída aos microrganismos e a forma como têm sido estudados enquanto promotores da degradação da matéria orgânica.

Na compostagem à escala industrial as questões microbiológicas colocam-se em termos de protecção da saúde pública. Trata-se do controlo das condições de compostagem de modo a eliminar os microrganismos patogénicos do composto (Farrell, 1993; Strauch, 1996) e de estudos relacionados com a presença destes microrganismos nos aerossóis das estações de tratamento e suas imediações (Epstein, 1993; Millner *et al.*, 1994; Fischer, 1996).

Em trabalhos de investigação aplicada, o principal objectivo dos estudos de caracterização é a distinção dos microrganismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica num determinado momento do processo. Bertoldi e Zucconi (1980), Albonetti e Massari (1979), Waksman *et al.* (1939a,b), fizeram a identificação de fungos e actinomicetes envolvidos no processo de compostagem. Strom (1985a) sintetizou resultados de diversos autores relativos à identificação de fungos, bactérias e actinomicetes isolados em compostagem em condições termofílicas e dedicou-se à identificação de bactérias termofílicas em amostras de composto de diferentes origens. Beffa *et al.* (1996) e Blanc *et al.* (1996) mostraram que a população termofílica é mais diversificada do que os resultados de Strom (1985a,b) faziam supôr. Miller (1992) apresentou também listagens exaustivas de espécies de bactérias, fungos e actinomicetes comuns em compostagem. Relativamente aos estudos de caracterização, Haug (1993, p.131) referiu que listagens exaustivas de microrganismos têm um interesse académico.

2. Revisão Bibliográfica

A caracterização quantitativa e qualitativa dos microrganismos envolvidos no processo de compostagem inclui sempre o método de "sementeira em placas de amostras em diluições sucessivas" ou método das "placas de diluição", em que se semeiam volumes determinados de amostra ou das suas diluições por incorporação ou por espalhamento à superfície de um meio de cultura em placa de Petri e se procede, após incubação, à contagem e isolamento das colónias, segundo critérios morfológicos, para identificação.

Para melhorar o conhecimento dos microrganismos isolados é frequente fazer-se a caracterização da actividade enzimática, e estes resultados são conjugados nomeadamente com a análise da variação dos constituintes do substrato como o amido, a hemicelulose, a celulose e a lenhina (Atkinson *et al.*, 1996a,b; Garcia *et al.*, 1992; Diaz-Raviña *et al.*, 1989; Bertoldi e Zucconi, 1980; Waksman *et al.*, 1939a,b).

Na realidade, as contagens em placas subestimam o número de microrganismos (Chung e Neethling 1988, Vestal e White 1989, Pichtel e Hays 1990, referidos por Atkinson *et al.*, 1996a,b). Tseng *et al.* (1996) referiram a propósito que com a utilização de meios não selectivos se conseguem contagens mais elevadas mas se desconhece a taxa de recuperação e os microrganismos isolados representam apenas uma fracção dos totais. Os métodos de isolamento que dependem dos métodos de cultura, podem excluir grande parte dos microrganismos endógenos devido à natureza selectiva do meio (Troussellier e Legendre, 1981). O trabalho de Amner *et al.* (1988) clarificou algumas das limitações do método das "placas de diluição": a taxa de recuperação dos microrganismos depende da técnica de extracção, dos reagentes usados bem como da natureza do meio de cultura.

Mas o problema de interpretação dos resultados de isolamento dos microrganismos em placas de cultura, não é apenas quantitativo mas também qualitativo. A questão que se coloca é a de distinguir microrganismos viáveis e microrganismos activos. Waksman *et al.* (1939a,b) alertaram para o facto do isolamento de um microrganismo numa pilha de composto, não ser suficiente para o associar às características particulares desse composto, aconselhando a utilização simultânea do método das "placas de diluição" e do método das "lamelas inclinadas". A observação ao microscópio dos microrganismos que se desenvolvem nas lamelas colocadas directamente no substrato em compostagem, permite confirmar a informação das placas, embora se trate sempre de observações pontuais que podem não ser representativas do conjunto do substrato.

Apesar da dificuldade em distinguir microrganismos viáveis e microrganismos activos através da cultura em placas, Nakasaki *et al.* (1985d), utilizando um método de irradiação por ultra-violetas para estimar a percentagem de esporos e formas vegetativas, concluíram que bactérias mesofílicas presentes em compostagem em condições termofílicas (60°C) estavam predominantemente na forma vegetativa (mais do que 60%), mas que não estavam activas porque não consumiam oxigénio em testes de actividade respiratória, a 60°C.

Para obter estimativas independentes das necessidades de crescimento dos microrganismos, Atkinson *et al.* (1996a,b) ensaiaram a utilização de fluorocrómio 4,6-diamidino-2-fenilindole (DAPI) para fixar as células antes das contagens e, usaram estes resultados como uma medida dos microrganismos activos. Mas verifica-se que o número de microrganismos se manteve constante no processo de compostagem embora a produção de CO₂ tenha decrescido.

Beffa *et al.* (1996) e Blanc *et al.* (1996) usaram determinações de ADN para a identificação das bactérias em amostras de composto de diferentes origens mas tendo procedido previamente à cultura e isolamento. Pfaller *et al.* (1994) desenvolveram uma técnica específica para purificar ADN em amostras de composto, de modo a reduzir interferências devidas à concentração de ácidos húmicos e fúlvicos.

Publicações recentes, (Meckes *et al.*, 1995; Press *et al.*, 1996), que incluem a caracterização da estrutura das comunidades microbianas ou a pesquisa de microrganismos patogénicos, utilizam na fase preparativa a cultura em placas e o isolamento, para a identificação posterior.

Brinton e Droffner (1994) referiram que a identificação das espécies de bactérias que participam no processo de compostagem não está feita devido à falta de métodos apropriados e, tal como Lynch (1993) e Amner *et al.* (1988), apontaram a necessidade de utilizar novos procedimentos que permitam que organismos específicos sejam monitorizados directamente sem ser necessário a utilização de meios de cultura.

Noble *et al.* (1997) utilizaram o microscópio electrónico de varrimento para avaliarem qualitativamente a importância relativa de populações de bactérias, fungos e actinomicetes, sem a necessidade de proceder à cultura prévia e isolamento destes microrganismos.

Outra forma de abordar o problema da caracterização quantitativa dos microorganismos sem recurso a contagens, consiste em medir a biomassa, assumindo que o número de microrganismos e biomassa são equivalentes. No caso dos organismos unicelulares, que se dividem quando crescem, o aumento da biomassa é acompanhado pelo aumento do número de células, mas, por exemplo, no crescimento dos bolores verifica-se o aumento de tamanho e de densidade, mas não necessariamente de número (Bailey e Ollis, 1986). Atkinson *et al.* (1996a,b) referiram que o número de fungos não é facilmente relacionado com a biomassa ou actividade potencial em amostras de composto, por causa da fragmentação das hifas e a formação de esporos.

No processo de compostagem, os resultados de evolução da biomassa e actividade não são unânimes, mas segundo Tseng *et al.* (1996), a modificação das condições ambientais pode influenciar directamente a actividade microbiana, mas não necessariamente afectar a quantidade de biomassa.

Para a medição da biomassa em compostagem utiliza-se a determinação da concentração de fosfolípidos (McKinley e Vestal 1984, 1985; McKinley *et al.*, 1985a,b; Derikx *et al.*, 1990) e de ATP (Bach *et al.*, 1984; Garcia *et al.*, 1992; Atkinson *et al.*, 1996b; Tseng *et al.*, 1996). Derikx *et al.* (1990) verificaram que a concentração de fosfolípidos aumenta no início do processo de compostagem e depois permanece constante quando a actividade, medida pela taxa de consumo de oxigénio, é mínima. McKinley e Vestal (1984, 1985) e McKinley *et al.* (1985a,b) constatarem um decréscimo de biomassa com o progresso da compostagem, apesar dos coeficientes de correlação entre a biomassa e qualquer das medidas de actividade usadas serem inferiores a 0.90. Tseng *et al.* (1996) desenvolveram um procedimento analítico para a determinação de ATP em amostras de composto e, em ensaios à escala laboratorial, concluíram que a produção de biomassa era semelhante no intervalo 40-60°C e se reduzia significativamente a 70°C. Apesar da actividade medida através da taxa de produção de CO₂ e consumo de O₂ decrescer na fase final dos ensaios, a concentração de biomassa medida através de ATP manteve-se constante. Garcia *et al.* (1992) verificaram que a concentração de ATP decresce durante a compostagem de lamas e da fracção orgânica de RSU, enquanto que Bach *et al.* (1984), apesar de não apresentarem os resultados, referiram que o padrão de aumento da concentração de ATP é paralelo ao padrão de evolução da taxa de CO₂ na compostagem de lamas.

A capacidade destes e outros métodos para distinguir biomassa activa e biomassa não activa é discutida, por Parkinson e Coleman (1991) no caso de amostras de solo. Newell (1992) fez uma revisão das técnicas usadas para medir a biomassa

fúngica num contexto distinto da compostagem, separando biomassa viva e total, referindo que o padrão de variação da concentração de ergosterol é muito semelhante ao da produção de dióxido de carbono. O ergosterol é um componente celular ausente nas bactérias e que se decompõe com a morte dos fungos.

2.3 Interpretação da taxa de produção de CO₂

Atkinson *et al.* (1996b) citam diversos trabalhos relativos à interpretação da variação da taxa de produção de CO₂ (Diaz-Raviña *et al.*, 1989; Greer *et al.*, 1990; Fogarty e Tuovinen, 1991; Riffaldi *et al.*, 1992; Ciavatta *et al.*, 1993; Hall *et al.*, 1993), mas na realidade constata-se que nenhum se ocupa especificamente deste assunto. Jeris e Regan (1973a,b,c) estudaram, em compostagem em condições isotérmicas, a influência de factores como a temperatura, a humidade, o pH e nutrientes, através da determinação da taxa de consumo de oxigénio ou de produção de CO₂.

Bagstam e Swensson (1976) e Bagstam (1977) estudaram as condições óptimas de compostagem de um substrato particular através da comparação qualitativa da evolução da taxa de produção de CO₂, em conjugação com outras medidas de avaliação global do processo. Clark *et al.* (1978) ensaiaram diferentes condições de compostagem em ensaios isotérmicos, que comparam através da evolução da taxa de produção de CO₂, utilizando a taxa máxima instantânea e a produção acumulada de CO₂. Noutros trabalhos da mesma época (Ashbolt e Line, 1982; Sikora *et al.*, 1983) verifica-se que a periodicidade das medições de CO₂ não confere fiabilidade às interpretações então feitas.

Nakasaki *et al.* (1985a,b,c), Nakasaki e Akiyama (1988), Nakasaki *et al.* (1992a), interpretaram as variações na taxa de produção de CO₂ através da sucessão de populações, definidas como bactérias, fungos e actinomicetes, determinadas através de contagens em placas de cultura. Nakasaki *et al.* (1985a,b) distinguiram as taxas de produção de CO₂ devidas a bactérias e a actinomicetes termofílicas.

A variação da taxa de produção de CO₂ foi interpretada por Atkinson *et al.* (1996b), com base nos resultados de contagens em placas e de degradação do substrato, como resultando da transição de actividade mesofílica para termofílica, apesar da temperatura se ter mantido constante (55°C) e a humidade limitante. Em publicação anterior (Atkinson *et al.*, 1996a), também relativa ao estudo da biodegradabilidade e da actividade microbiana em compostagem, estes autores

apresentam a variação da taxa horária de produção de CO₂, mas a sua interpretação é mais sumária.

2.4 Dinâmica de populações

A compostagem é um exemplo da aplicação de culturas mistas naturais no tratamento de substratos sólidos. Bactérias, fungos e actinomicetes são os principais microrganismos envolvidos (Finstein *et al.*, 1980; Miller, 1992; Haug, 1993). Populações mistas naturalmente presentes são especialmente eficientes na utilização de substratos mistos. Waksman *et al.* (1939a) inocularam um substrato com culturas puras de bactérias, actinomicetes e fungos e verificaram que as bactérias e as actinomicetes não eram capazes de atingir o mesmo grau de decomposição que a população mista. O crescimento simultâneo de várias espécies oferece vantagens relativamente a culturas puras, devido a maior diversidade metabólica e sinergismos nutricionais, o que significa que um grupo de microrganismos degrada o substrato e origina outros compostos que são usados por outros microrganismos (Golueke, 1992).

De uma forma genérica, as bactérias toleram temperaturas mais elevadas do que os fungos (Strom 1985b), são mais exigentes no que se refere à humidade (Miller, 1989), ao pH (Boyd, 1984 referido por EPA, s.d.) e às necessidades de azoto (Haug, 1993). As bactérias podem ser aeróbias, anaeróbias ou facultativas, enquanto que a maioria dos fungos são aeróbios (Haug, 1993). As actinomicetes colapsam quando a temperatura é superior a 70°C, poucas sobrevivem acima dos 60°C e toleram temperaturas de 50°C, são tão exigentes quanto os fungos relativamente à humidade, preferem pH neutro ou ligeiramente alcalino e condições aeróbias. Gotaas (1959), Golueke (1977) e Miller (1991, 1992) reuniram informação detalhada sobre este assunto.

Os factores referidos são apenas alguns dos que influenciam o crescimento dos microrganismos, que actuam de forma interactiva, pelo que a alteração de um pode modificar os outros, tal como foi evidenciado por Miller (1991). Mas também a morfologia de um microrganismo tem influência na velocidade de transferência de massa de um dado nutriente, e por isso a existência de micélio pode significar resistência acrescida (Bailey e Ollis, 1986). Assim, os microrganismos que crescem num determinado momento são o resultado de uma seleção natural condicionada por restrições diversas e estão especialmente adaptados para crescer nesse ambiente.

As características ou preferências ecológicas provocam a sucessão de microrganismos em compostagem. De acordo com diversos autores referidos por Bertoldi *et al.* (1983), a compostagem passa por vários estádios, cada um deles caracterizado pela actividade de grupos de microrganismos diferentes. A acção dos microrganismos e até o modo de operação, modificam o meio e provocam a sua selecção.

Apesar de serem vários os factores que interferem no processo de compostagem, a temperatura é o aspecto mais relevante e por isso a sucessão provocada pela sua variação é frequentemente referida (Finsten, 1980; Finstein *et al.*, 1980; Finstein, 1992; Haug, 1993): a degradação da matéria orgânica, pela acção de uma população mesofílica, provoca a libertação de calor, que se acumula e conduz ao aumento da temperatura; a população mesofílica é substituída por uma termofílica; a limitação da actividade microbiana devido a uma temperatura excessiva provoca o seu decréscimo e o reaparecimento de microrganismos mesofílicos.

A redução da produção de calor foi observada durante a subida de temperatura em ensaios adiabáticos por Walker e Harrison (1960) e interpretada pela substituição da população inicial mesofílica por uma outra termofílica. Esta questão foi amplamente discutida por Finstein e Morris (1975) que reforçaram a conclusão anterior.

Miller (1992), apresentou uma revisão dos resultados publicados sobre a influência da temperatura no comportamento dos microrganismos e concluiu que, em compostagem, o valor máximo do número das bactérias termofílicas atinge 10^8 - 10^{12} /g substrato (55-65°C), podendo ser de uma ordem de grandeza superior na gama de temperaturas mesofílicas. O valor mais elevado das actinomicetes termofílicas surge a seguir ao das bactérias (10^7 - 10^9 /g substrato), enquanto que o máximo relativo aos fungos termofílicos se verifica no declínio de actividade, quando a temperatura atinge os 50°C, com valores da ordem de 10^5 - 10^8 /g substrato.

Em outros trabalhos é considerada a temperatura mas também a natureza do substrato para explicar a sucessão (MacGregor *et al.*, 1981; Miller, 1991; Beffa *et al.*, 1995): na fase inicial as bactérias são os decompositores mais importantes, devido à capacidade para crescerem rapidamente em substratos facilmente disponíveis, nomeadamente proteínas solúveis e por serem mais tolerantes a temperaturas elevadas; a redução da temperatura explica que os fungos sejam importantes sobretudo nas últimas fases da compostagem e na degradação de substâncias complexas (celulose e lenhina); as actinomicetes, pelo facto de terem

2. Revisão Bibliográfica

velocidades de crescimento menores do que as das bactérias, também são comuns na fase final da compostagem e, nessa altura, degradam moléculas orgânicas complexas.

Distinguir os factores que condicionam a sucessão de microrganismos não é fácil. Miller (1991) referiu que substratos ricos em proteínas (resíduos da exploração pecuária, lamas de ETAR) devem favorecer as bactérias devido ao teor elevado em azoto orgânico e que depois do consumo das proteínas facilmente disponíveis, os fungos e actinomicetes estão melhor adaptados para consumo de compostos complexos, como a hemicelulose, a celulose e a lenhina. Mas a situação parece ser outra: em substratos em que o azoto é limitante, nomeadamente de natureza celulósica, os fungos têm vantagens competitivas. Quando o azoto não é limitante existem provavelmente outros factores responsáveis pelo favorecimento das bactérias relativamente aos fungos. Esta linha de raciocínio está de acordo com Haug (1993). Este autor acrescentou que como os fungos e as bactérias usam o mesmo tipo de substratos é comum a competição; contudo, substratos secos ou com reduzida concentração de azoto podem favorecer o crescimento dos fungos enquanto que disponibilidade de O₂ reduzida, temperaturas elevadas ou condições de agitação mecânica podem favorecer as bactérias.

Bertoldi (1995b), EPA (s.d.), sem a preocupação de distinguir o(s) factor(es) responsáveis pela sucessão, fizeram a interpretação da evolução microbiológica no processo de compostagem referindo outros aspectos, nomeadamente a concentração de oxigénio e o pH. Kubocz e Gruneklee (1995) estudaram a sucessão de grupos de microrganismos (bactérias, bolores e leveduras) com base em contagens no sistema ECC, procurando a justificação na variação das condições de temperatura, humidade, pH e substrato.

Existem estudos de sucessão de populações, aplicados a domínios muito diferentes (Figura 2.1). Bailey e Ollis (1986) bem como Cechi *et al.* (1994) e Wanner (1994), apresentaram dados referentes ao tratamento de águas residuais por lamas activadas enquanto que Bishop e Kinner (1986) e Iwai e Kitao (1994) estudaram sucessões em sistemas de filme fixo. A sucessão de microrganismos durante a armazenagem de cereais é outro exemplo (Pelhate, 1982a,b). Trata-se da análise da variação temporal do número de indivíduos ou da biomassa, complementada com outros dados nomeadamente de variação da composição do substrato e condições físicas (humidade, temperatura, oxigénio).

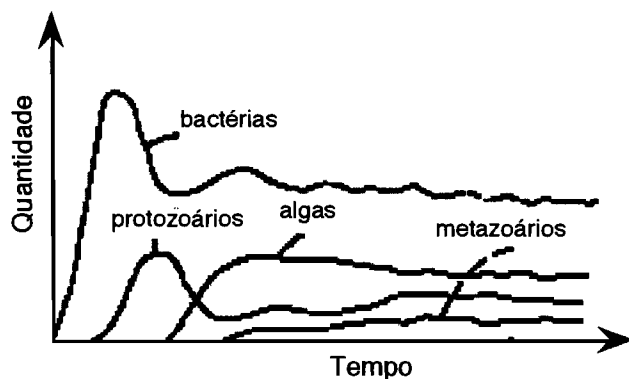


Figura 2.1. Sucessão de microrganismos em filme fixo (Iwai e Kitao, 1994)

As espécies de uma população interagem entre si, bem como as espécies de populações diferentes. Pitter e Chudoba (1990), Bailey e Ollis (1986) definiram os diversos tipos de interações entre duas espécies, susceptíveis de serem estendidas a mais espécies, como neutralismo, mutualismo, predação, comensalismo, amensalismo, competição, e referiram os dois últimos casos como os mais frequentes .

A competição entre bactérias e fungos pelo substrato em compostagem foi já referida. Golueke (1977, 1982) e Bertoldi *et al.* (1983) discutiram mecanismos de destruição de microrganismos patogénicos em compostagem. Entre os estudos recentes de ecologia no âmbito da compostagem, citam-se os trabalhos de Hoitink *et al.* (1993, 1995) e Hoitink e Grebus (1994) sobre mecanismos de controlo de doenças de plantas através da utilização de composto e de Miller *et al.* (1990) sobre a produção de composto para o cultivo do cogumelo *Agaricus brunnescens* .

2.5 Modelação da compostagem

Entre os trabalhos recentes de análise quantitativa de aspectos específicos do processo de compostagem, citam-se Lomax *et al.* (1984), Finstein *et al.* (1986a), Bach *et al.* (1987) e Hogan (1989), no que se refere às transferências de calor, Nakasaki *et al.* (1987a) sobre difusão de oxigénio, Miller (1989) sobre humidade e Das e Keener (1996) sobre humidade e compactação. A consideração da variável tempo nestas análises permite um melhor conhecimento do processo, por exemplo, a determinação da velocidade das reacções físicas, químicas e biológicas é importante para o dimensionamento de um reactor por forma a se atingir um determinado grau de estabilização da matéria orgânica.

Os modelos matemáticos de simulação do processo de compostagem integram balanços de massa e de energia e a cinética da degradação da matéria orgânica, para o que é necessário dispôr de dados sobre o substrato, nomeadamente composição, humidade, biodegradabilidade e calor de combustão, e estabelecer condições adequadas de temperatura e de humidade final para o composto.

Numa abordagem global do processo de compostagem, refere-se o modelo de simulação desenvolvido por Haug (1980, 1993), aplicado à compostagem de lamas (Haug 1986a,b,c; Haug e Tortorici, 1986) e recentemente para mostrar a influência da composição do substrato no dimensionamento e operação de estações de tratamento (Haug, 1996). Trata-se da integração de balanços de massa e energia e de equações de cinética de degradação de sólidos voláteis biodegradáveis, com as constantes de velocidade, ajustadas através de expressões empíricas, relativamente à temperatura, humidade e volume livre. O modelo foi desenvolvido para condições de compostagem com alimentação contínua e mistura completa e é aplicável à situação de sistema fechado e fluxo pistão, se se considerar este último equivalente a uma série (temporal) de reactores de mistura completa, em que a saída de cada um constitui a alimentação do seguinte. Fixada a temperatura de controlo e a humidade em cada estágio, através de um processo iterativo, o modelo calcula o valor da temperatura para o qual as entradas de energia igualam a energia que sai de cada estágio e o processo prossegue nos diferentes estágios até que os balanços sejam praticamente idênticos. O modelo pretende simular o processo de compostagem em reactor, em pilhas revolvidas periodicamente e em pilhas estáticas com arejamento forçado.

Nakasaki *et al.* (1987b) desenvolveram um modelo de compostagem que utiliza a formulação desenvolvida por Bach *et al.* (1987) e envolve a resolução em simultâneo de equações de balanço de massa e energia. O cálculo do calor produzido necessita permanentemente de dados experimentais da taxa de reacção (evolução da taxa específica de produção de CO₂ ou de consumo de O₂ e do coeficiente de conversão de sólidos voláteis a CO₂). Nakasaki *et al.* (1987b) resolveram esta questão integrando no modelo resultados de ensaios anteriores exprimindo a dependência entre a taxa específica de produção de CO₂, a conversão de matéria orgânica e a temperatura. Deste modo, Nakasaki *et al.* (1987b) conseguiram não só prever a evolução da temperatura e humidade mas também da evolução da taxa específica de produção de CO₂ e a conversão de sólidos voláteis. O ajustamento entre valores estimados e observados é satisfatório sobretudo no que se refere à compostagem em condições laboratoriais.

Keener *et al.* (1993, 1996) preocupados com a optimização do processo de compostagem e numa análise macroscópica do sistema, identificaram variáveis de controlo e desenvolveram um conjunto de expressões analíticas, também baseadas em balanços de massa e energia, leis básicas e relações empíricas, que relacionam aspectos biológicos, físicos e económicos. A sua preocupação foi, essencialmente, tratar aspectos específicos que têm influência directa nos custos de operação de uma estação de tratamento. Estes autores desenvolveram os conceitos de "equilibrium mass" (m_e), "compost equilibrium value" (β) e "compost mass ratio" (mR): no primeiro, m_e , assume-se que a degradação microbiana do substrato inicial expresso em peso seco (m_0), atinge um equilíbrio; β , (m_e/m_0), representa a fracção do substrato não degradado após um período longo de compostagem (seis meses a um ano); e mR , $((m(\theta) - m_e)/(m_0 - m_e) = e^{-k\theta}$, onde k é a constante de decomposição e θ é o tempo), é uma forma de descrever até onde foi levado o processo de compostagem, é um número adimensional e varia entre um e zero. A constante de decomposição k , e β são determinadas experimentalmente. Estes autores mostraram, ainda, a importância da especificação da maturidade do composto na optimização da eficiência do processo de compostagem, definindo um índice de maturidade (MI), calculado através de k , β e da taxa de consumo de oxigénio do composto.

Hamelers (1993) desenvolveu um modelo conceptual para a compostagem, designado por "Composting Particule Kinetics" (CPK) que utiliza as sugestões apontadas por Haug (1980, 1993, p.393) sobre a influência da solubilização do substrato, do transporte de oxigénio, da utilização do substrato solubilizado e do oxigénio no processo de compostagem, bem como conhecimentos usados nos sistemas de filme fixo.

O modelo CPK baseia-se na compreensão do comportamento da compostagem através da análise da resposta cinética da partícula. As partículas são demasiado grandes para serem homogéneas: são constituídas por uma parte interior, anaeróbia, onde o substrato polimérico insolúvel é convertido em substrato monomérico solúvel, que difunde para a camada exterior, aeróbia onde é oxidado biologicamente. Cada partícula é constituída por uma fase sólida e microporos, preenchidos por água e gás. As reacções biológicas dão-se na fase aquosa e os compostos são transportados por difusão nesta fase e também na fase gasosa. A temperatura é constante no interior da partícula e o gradiente de oxigénio origina gradientes de biomassa e substrato. A evolução da taxa de consumo de oxigénio, segundo este autor, só pode ser compreendida tendo em atenção estes gradientes. A formulação matemática do modelo, que se apresenta resumidamente em anexo, inclui a variação temporal do substrato monomérico, do substrato

polimérico, da biomassa e do oxigénio, mas não considera a variável temperatura. A hidrólise do substrato e decréscimo da biomassa são descritas por uma cinética de 1ª ordem e uma cinética do tipo de Monod/Monod é usada para descrever o efeito do substrato, do oxigénio e da biomassa na taxa de oxidação. Uma análise de sensibilidade aplicada ao modelo CPK mostra que o processo de compostagem é sucessivamente limitado pelo crescimento da biomassa, transporte de oxigénio e hidrólise do substrato. O modelo foi validado através da comparação da previsão da evolução da taxa de consumo de O_2 com medições feitas para diferentes tipos de resíduos. A comparação mostrou que o modelo descreve tanto o desenvolvimento no tempo como a grandeza da taxa. As diferenças são justificadas na variação da composição dos resíduos. O modelo é capaz de prever o efeito de mistura na compostagem de resíduos macroscopicamente homogêneos. O autor reconhece contudo que, embora os resíduos sejam constituídos por uma grande variedade de microrganismos e substratos, o modelo só considera dois tipos de substrato (polimérico insolúvel e monomérico solúvel) e um tipo de biomassa.

Uma descrição completa da cinética da compostagem é difícil pela complexidade do processo: trata-se habitualmente de substratos e populações mistas e um conjunto de variáveis que podem, em momentos diversos, influenciar a taxa de reacção, sendo frequentemente impossível isolar as suas acções.

Whang e Meenaghan (1980) aplicaram, sem justificar, a formulação da cinética de enzima-substrato de Michaelis-Menten ao processo de compostagem. Haug (1980) assumiu que, na ausência de informação em contrário, a oxidação da matéria orgânica biodegradável seguia uma cinética de primeira ordem relativamente à quantidade de matéria remanescente e a constante de reacção variava sobretudo com a temperatura, sendo corrigida para a concentração de oxigénio, humidade e porosidade. Posteriormente, Haug e Ellsworth (1991) mediram o consumo de oxigénio de diferentes substratos e a taxa de reacção foi modelada através de uma cinética de primeira ordem e o substrato dividido em duas fracções a que correspondem taxas de reacção diferentes. As constantes são de qualquer forma muito inferiores às obtidas para águas residuais que Haug (1996) interpretou através de limitações associadas à natureza do substrato. Namkoong e Hwang (1997) obtiveram resultados muito semelhantes aos anteriores medindo a redução de sólidos voláteis.

Marugg *et al.* (1993) utilizaram os conceitos desenvolvidos por Keener *et al.* (1993) na análise da compostagem de resíduos de jardim e verificaram experimentalmente que a taxa de degradação do substrato na fase activa segue

uma cinética de primeira ordem. Adani *et al.* (1997) chegaram também a uma cinética de primeira ordem na fase activa e de segunda ordem para a fase de maturação enquanto que, usando dados anteriores, obtiveram uma cinética de primeira ordem para a fase activa e de segunda ordem para o conjunto das duas fases. Genevini *et al.* (1997), referido por Adani *et al.* (1997), propuseram uma cinética de primeira ordem para a fase activa e que a taxa de reacção do conjunto do processo seja a média de taxas parciais. Haug (1993, p.367) e Keener *et al.* (1993) reuniram valores da taxa de reacção para diversos substratos em condições diferentes de compostagem, determinados através do consumo de oxigénio e da degradação do substrato.

Recentemente, Kaiser (1996) desenvolveu um modelo de compostagem que representa um avanço no processo de modelação. Trata-se de um modelo de simulação que inclui balanços de massa e energia e a conversão da matéria orgânica; reúne numa formulação matemática os efeitos termodinâmicos e cinéticos da conversão da matéria orgânica em compostagem. A análise termodinâmica é semelhante à desenvolvida por Nakasaki *et al.* (1987b) e Haug (1993): faz uma abordagem macroscópica do sistema, considerando uma distribuição homogénea de fases (sólida, líquida e gasosa) no seio do material em compostagem e desenvolve um balanço de CO₂, de água e calor que estão relacionados, nomeadamente através da estequiometria da reacção de oxidação da matéria orgânica (a produção de água biológica e de calor são proporcionais à evolução de CO₂). O modelo reúne uma classificação em substratos-tipo habitual em compostagem e uma classificação em microrganismos-tipo usada na degradação aeróbia da matéria vegetal. O interesse do modelo reside exactamente em considerar, em vez de um substrato constituído simplesmente por água, matéria volátil e uma fracção não degradada (Nakasaki *et al.*, 1987b), a massa total do substrato repartida em glúcidos simples, amido, hemicelulose, celulose, lenhina e, em distinguir bactérias, actinomicetes, "fungos castanhos" e "fungos brancos" (Figura 2.2). O crescimento dos microrganismos e a degradação do substrato baseia-se também, como o modelo CPK, numa cinética tipo de Monod. O modelo com base na composição do substrato (água, sólidos voláteis e cinzas), temperatura do processo, massa, volume e concentração de CO₂ no ar de saída é capaz de prever a evolução da actividade microbiana expressa no crescimento de biomassa (kg h⁻¹) diferenciada em bactérias, actinomicetes, "fungos castanhos" e "fungos brancos" e a evolução da composição do substrato diferenciada em glúcidos simples, amido, hemicelulose, celulose, lenhina, matéria mineral e água. Uma síntese da formulação matemática do modelo de Kaiser (1996) é apresentada em anexo.

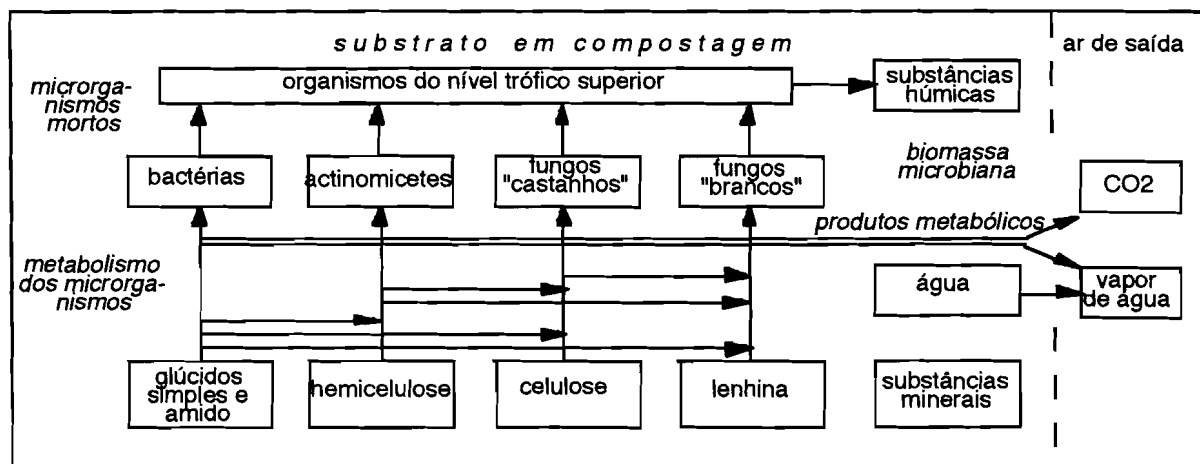


Figura 2.2- Modelo conceptual do processo de compostagem (Kaiser, 1996)

3. PLANO EXPERIMENTAL

Para a prossecução dos objectivos do trabalho fixou-se o seguinte plano experimental:

Fase 1- caracterização do funcionamento da instalação piloto de compostagem nos regimes de temperatura fixa (25 e 40°C) e temperatura variável (25 a 40°C) de modo a avaliar

- 1.1- fiabilidade e reprodutibilidade
- 1.2- evolução da temperatura, humidade, pH e composição do substrato
- 1.3- gradientes de temperatura, humidade e de degradação do substrato
- 1.4- adição suplementar de amido

Fase 2- desenvolvimento do modelo cinético de compostagem

- 2.1- efeito da duração
- 2.2- efeito da temperatura
- 2.3- alteração do aspecto macroscópico do substrato
- 2.4- identificação dos bolores activos

Realizou-se um conjunto dos ensaios para analisar o funcionamento da instalação piloto de compostagem nos regimes de temperatura fixa (25 e 40°C) e temperatura variável (25-40°C), nomeadamente no que diz respeito à evolução global de temperatura, humidade, pH, composição do substrato e à possibilidade de existência de gradientes desta natureza no interior do reactor. Procedeu-se à adição suplementar de amido no início e na fase final da compostagem no sentido da compreensão da degradação do substrato.

As condições de ensaio foram repetidas para o desenvolvimento do modelo cinético de compostagem e, em simultâneo, para observação da alteração do aspecto macroscópico do substrato. Realizaram-se ensaios de longa duração para avaliar o comportamento do modelo cinético e identificar os bolores activos.

No Quadro 3.1 discriminam-se e caracterizam-se sinteticamente os ensaios realizados.

Quadro 3.1- Plano experimental

Fase/Objectivo	Ensaio			Observações
	25°C	40°C	25-40°C	
Fase 1- Caracterização do funcionamento da instalação piloto de compostagem				
Fiabilidade		E.B*		ensaio acompanhado com a recolha de amostras em momentos intermédios para a determinação do balanço de carbono, da estequiometria da reacção e da evolução da relação carbono/azoto
Reprodutibilidade	EI.1			avaliação realizada através da produção de CO ₂
Evolução da temperatura, humidade, pH e composição do substrato	EI.3 EI.4	E.A* EII.4	EIII.1 EIII.3	recolha de amostras em momentos intermédios a partir de um reactor retirado do banho para as determinações de humidade, pH, cinza total, amido, hemicelulose, celulose e lenhina e, nos EI.4, EII.4 e EIII.3, também para a contagem de bactérias e bolores
Gradiente de temperatura		EII.3 EII.5	EIII.3	termistores colocados em diferentes pontos do reactor
Gradientes de humidade e de degradação de substrato	EI.4	EII.4	EIII.3	recolha de amostras em momentos intermédios segundo uma grelha compreendendo 12 fracções do substrato para as determinações de humidade, cinza total e amido
Adição suplementar de amido - no início - na fase final		EII.7 EII.8		adição de amido na fase final do ensaio EII.4, acompanhado através da produção de CO ₂ (EII.8)
Fase 2- Desenvolvimento do modelo cinético de compostagem				
Efeito da duração	EI.1 EI.2			
Efeito da temperatura e alteração do aspecto macroscópico do substrato	EI.1 EI.2 EI.3 EI.4 EI.5	EII.1 EII.2 EII.3 EII.4 EII.5 EII.6 E.A* E.B*	EIII.1 EIII.2 EIII.3	medição da temperatura do substrato e da água do banho, pesagem do substrato e determinação de humidade. A reprodutibilidade no funcionamento da instalação foi verificada através da produção de CO ₂
Identificação de bolores activos	EI.5	EII.6		

(*) O ensaio foi realizado acima de 40°C

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Instalação piloto de compostagem

4.1.1 Descrição

A instalação piloto de compostagem, concebida e construída no âmbito desta dissertação, incluía cinco componentes (Figura 4.1):

- reactores biológicos
- linha de ar
- sistema de controlo de temperatura
- aparelhos de medida
- sistema de comando e aquisição de dados

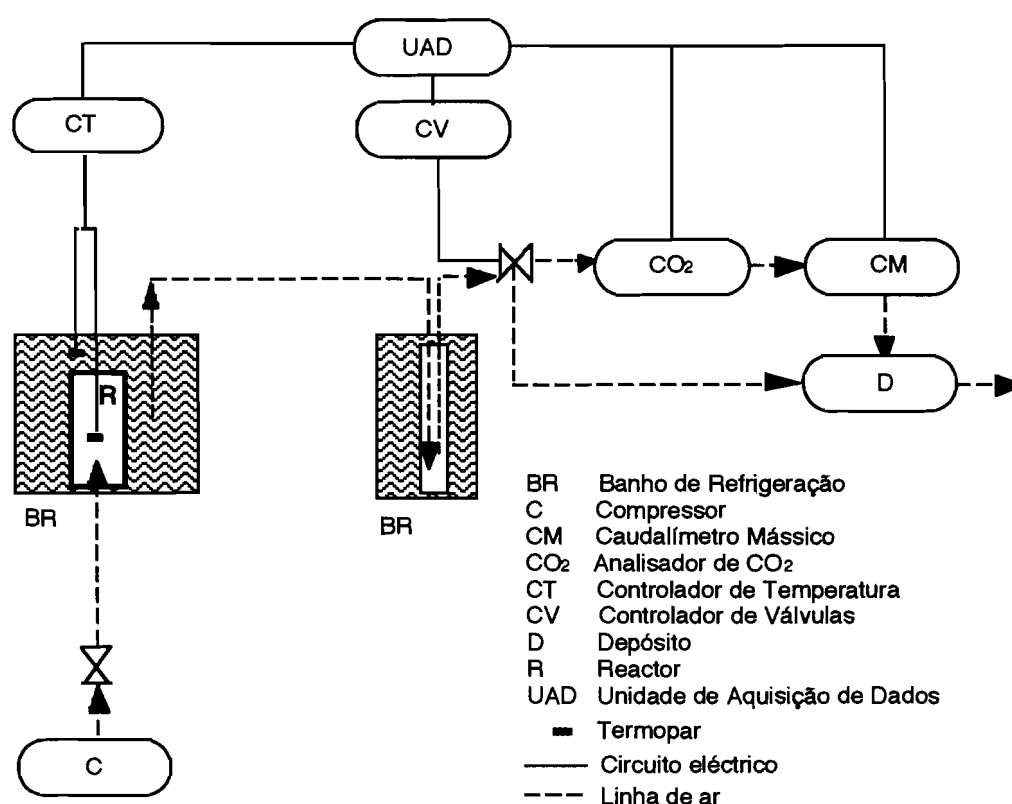


Figura 4.1- Esquema da instalação piloto de compostagem

Reactores biológicos

Cada reactor era constituído por um vaso cilíndrico, com as dimensões úteis de 23 centímetros de altura e 9 centímetros de diâmetro, e uma tampa, em vidro (pirex). A tampa tinha cinco tubuladuras roscadas para entrada de ar, saída de gases e instalação de sondas de temperatura. A tampa ajustava-se ao vaso através de um anel de silicone, superfícies esmeriladas e uma cinta metálica com aperto regulável. Uma rede plástica colocada no interior do vaso e com as mesmas

4. Materiais e Métodos

dimensões, reduzia a superfície de contacto entre o vaso e o substrato em compostagem. A instalação piloto de compostagem permitia o funcionamento simultâneo de cinco reactores.

Linha de ar

A linha que fornecia o ar aos reactores biológicos incluía um compressor (isento de óleo), uma válvula redutora de pressão e duas válvulas de repartição montadas em paralelo, com quatro saídas e parafusos para ajuste individual dos caudais (SKC, 5-500ml/min). A pressão do ar à saída do compressor (3 bar) era reduzida para 1 bar antes dos reactores. O ar era injectado através de um tubo de plástico rijo no fundo de cada reactor e distribuído pelo substrato através de uma rede fina em inox. Os gases eram recolhidos no topo do reactor e saíam para o exterior através de um tubo também de plástico rijo. Os gases de saída eram arrefecidos pela passagem numa serpentina de vidro mergulhada numa mistura água e álcool (40/60%) proveniente de um banho de refrigeração com recirculação (modelo Haake G, da Cole-Parmer) e regulado para zero graus. A água de condensação era recolhida numa proveta graduada colocada na parte inferior da serpentina de vidro. Um conjunto de cinco electroválvulas (modelo microelectroválvula, da Univer, Itália) conduzia os gases de saída do reactor em análise para os aparelhos de medida e os gases dos outros reactores para o exterior. Um depósito em plástico com cinco litros de capacidade, colocado a seguir aos aparelhos de medida e antes do tubo de saída dos gases para o exterior, evitava oscilações de pressão na linha de ar.

Sistema de controlo de temperatura

Os reactores estavam imersos, com o auxílio de garras metálicas, num reservatório de água, em acrílico. Nos ensaios a temperatura constante, a temperatura da água era controlada através de um termopar protegido com bainha de vidro, colocado aproximadamente no centro do substrato em compostagem, coordenadas (0,10,0), e ligado a um controlador de temperatura. Nos ensaios a temperatura variável, usavam-se dois termopares (tipo T), ambos protegidos por bainha de vidro, um colocado no substrato em compostagem e o outro na água, ligados ao controlador de temperatura (modelo Rex-G9, da RKC, Japão). O aquecimento ou arrefecimento da água era feito num banho de refrigeração (modelo ultratermostato Frigiterm, da Selecta), comandado pelo controlador de temperatura. A água do reservatório em acrílico, para além de estar em circulação permanente através de uma bomba, alimentava graviticamente o banho de refrigeração e voltava novamente ao

reservatório através de outra bomba magnética (modelo MD-6, da Iwaki). Os dois termopares estavam ligados através do controlador de temperatura à unidade de aquisição de dados (modelo Delta Logger, da Delta T Devices, Bruwell, Cambridge, Reino Unido). A temperatura dos outros reactores era medida por termistores (modelo ST1, da Delta T Devices, Bruwell, Cambridge, Reino Unido, precisão $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) instalados também aproximadamente no centro do substrato em compostagem, coordenadas (0,10,0), e ligados à unidade de aquisição de dados.

Aparelhos de medida

Os aparelhos de medida compreendiam um analisador de CO_2 com célula de infravermelhos (modelo LFH10, da ADC, precisão 0.1% na escala de 0-10%) e um caudalímetro mássico (modelo GFM-1700, da Aalborg Instruments, Cole-Parmer, 0-500ml/min em condições de PTN, precisão 2%) colocados em série. O analisador de CO_2 e o caudalímetro mássico tinham saídas apropriadas para ligação à unidade de aquisição de dados.

Sistema de comando e aquisição de dados

As electroválvulas eram comandadas através de uma interface (modelo PC63 relay O/P board, da Amplicon Liveline, Reino Unido) instalada num computador e um programa que determinava a abertura de cada válvula.

A unidade de aquisição de dados recolhia no início de cada hora a temperatura de todas as sondas instaladas e, nos últimos 30 segundos de cada período de cinco minutos, a concentração de CO_2 , a escala usada para a medição da concentração de CO_2 (0-10%) e o caudal do reactor que estava em análise.

4.1.2 Modo operativo

A instalação piloto de compostagem foi concebida para funcionar em condições de temperatura fixa ou temperatura variável e caudal de ar constante, por forma a que a concentração de CO_2 no ar de saída não fosse superior a 5%. No primeiro regime de funcionamento, ensaios a 25°C e ensaios a 40°C , a temperatura do reactor que comandava o ensaio era previamente fixada e determinava permanentemente a temperatura da água no reservatório em acrílico. Nas condições de temperatura variável, ensaios $25\text{-}40^{\circ}\text{C}$, a temperatura da água era fixada dois graus abaixo da temperatura do substrato em compostagem e, à

4. Materiais e Métodos

medida que esta última aumentava, subia também a temperatura da água. Quando o substrato atingia 40°C modificava-se o tipo de controlo e o ensaio passava a ser de temperatura fixa.

No início dos ensaios, a temperatura do substrato em compostagem mantinha-se constante, à custa de aquecimento. Quando se iniciava a produção de CO₂ arrancava o controlo automático da temperatura para, através de arrefecimento do banho, assegurar aquela constância ou para, através do aquecimento do mesmo, reduzir as perdas de calor permitindo a elevação da temperatura do substrato. Na fase final era necessário aquecer para manter a temperatura de compostagem igual à fixada. Os ensaios terminavam quando a percentagem do CO₂ era inferior a 1-2%.

Numa fase preliminar, a instalação piloto de compostagem funcionou fixando a temperatura do banho em vez da temperatura do reactor. Deste modo, não se controlava directamente a temperatura desenvolvida pelo substrato.

A possibilidade de funcionar com vários reactores pretendeu servir dois objectivos:

- realizar réplicas do mesmo ensaio e
- obter amostras em tempos intermédios, por retirada sucessiva de reactores

4.2 Substrato

O substrato usado nos ensaios de compostagem foi uma mistura de casca de arroz, farinha escura e farinha branca (50/34/16% peso seco). Hogan *et al.* (1989) utilizaram uma mistura semelhante para desenvolver o modelo físico da compostagem. A casca de arroz e a farinha escura resultaram do descasque de arroz num moinho tradicional. A humidade da mistura foi ajustada no início dos ensaios, com água corrente. Em cada reactor usaram-se 870g da mistura, com aproximadamente 60% de humidade.

4.3 Amostragem

4.3.1 Temperatura

Na Figura 4.2 apresenta-se a localização do termopar de controlo da temperatura do banho ou do termistor usado para medir a temperatura do reactor, bem como dos outros termistores usados para medir o gradiente de temperatura no substrato em compostagem.

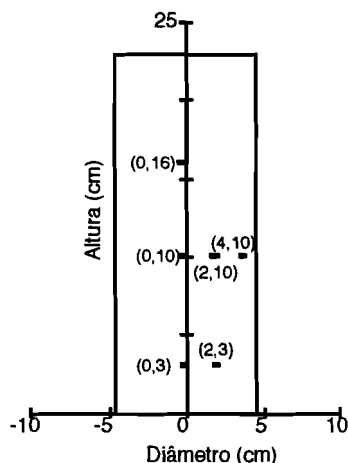


Figura 4.2- Representação do substrato em compostagem- localização dos pontos de medição de temperatura

4.3.2 Amostras sólidas

Após mistura do conteúdo de cada reactor, recolhia-se uma amostra para a contagem de microrganismos e a determinação do pH, sendo o restante substrato usado para a determinação de humidade. Depois de seco, o substrato era triturado e utilizado para as determinações de cinza total, de amido, de hemicelulose, de celulose e lenhina.

Para a avaliação de gradientes de humidade e de degradação do substrato, o conteúdo de cada reactor foi dividido em quatro porções, designadas por topo, "intermédio 1", "intermédio 2" e fundo, e cada porção separada em interior, meio e exterior (diâmetro exterior respectivamente, 3cm, 4cm e 4.5cm) (Figuras 4.3). De cada uma destas doze fracções retirou-se uma amostra para as determinações de humidade, cinza total e amido e o restante foi misturado com as outras fracções para análise da composição global.

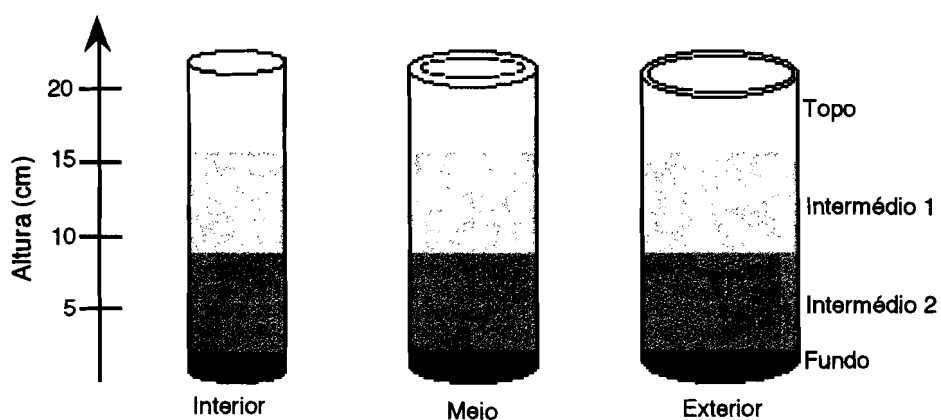


Figura 4.3- Representação do substrato em compostagem- fraccionamento do substrato para recolha de amostras para a determinação de humidade e análises químicas

4.4 Métodos analíticos

A determinação do teor de humidade baseou-se na NP 875 (1983), tendo-se utilizado a quantidade total de substrato. O pH foi determinado numa suspensão de 25g em 250ml de água destilada, após 2 horas de agitação em placa magnética, com um electrodo apropriado (Orion™). O teor de cinza total foi determinado na mufla a 550°C durante 2 horas. As determinações do teor de matéria gorda e proteína bruta foram realizadas, respectivamente, segundo a NP 876 (1988) e NP 2030 (1996), pelo Instituto Nacional de Investigação Agrária, Departamento de Tecnologia dos Produtos de Origem Animal. A determinação de amido baseou-se na NP 2026 (1987). A determinação de hemicelulose, celulose e lenhina foi feita no sistema Fibertec (Tecator), segundo manual e notas de aplicação baseadas no método de Van Soest (AN 03/78; AN 04/78; AN 06/78). O método foi adaptado para situações de substratos com elevada concentração de amido e extracção sequencial, usando inicialmente a solução de detergente neutro seguida da solução de detergente ácido. A análise elementar (carbono, azoto e hidrogénio) foi realizada no analisador EA1108-Elementar Analyser, modelo CHNS-O, da Carlo Erba Instrumenters, associado a um registador-integrador modelo DP200 da mesma marca, conforme manual de instruções. As amostras foram trituradas num moinho ultracentrífugo (modelo ZM1, da Retsch) e a granulometria para a determinação de cinza total era inferior a 1mm, enquanto que, para as determinações de amido, de hemicelulose, de celulose, de lenhina e para a análise elementar era inferior a 0.12mm.

A contagem de colónias de bactérias e bolores foi feita segundo o método de "sementeira em placas de amostras em diluições sucessivas" ou método das "placas de diluição", baseado no projecto de Norma Portuguesa designada por "Qualidade da Água- Determinação de microrganismos viáveis, Contagem de colónias por inoculação em ou sobre meio de cultura nutriente em agar", em harmonização com ISO 6222 (1988). A semente (1ml) foi retirada de uma suspensão idêntica à usada para medir o pH, mas em água esterilizada, tendo-se procedido à sua diluição numa solução tampão de fosfato e usado os meios de cultura Nutriente Agar desidratado (Difco) e Bacto Dextrose Agar desidratado (Difco). As placas de Petri foram incubadas à temperatura de ensaio (25 ou 40°C). Não foi determinada a quantidade de leveduras presentes e, em caso de dúvida, usou-se o microscópio para as distinguir das bactérias.

A identificação de bolores foi feita no Laboratório Nacional de Investigação Veterinária, Departamento de Parasitologia e Micologia, com base em critérios morfológicos (Onions *et al.*, 1981), à lupa (modelo M5A, da Wild), com ampliação

250, e, excepcionalmente, ao microscópio (modelo SM Lux, da Leitz), com ampliação 400. Para a caracterização dos bolores no substrato, no início, recorreu-se à cultura em placas de Petri, conforme método anterior, e incubação a 25°C e 40°C, tendo-se usado, excepcionalmente, o meio de cultura Cook Rose Bengal desidratado (Difco) sugerido pela NP 2078 (1985), com terramicina. No estudo de sucessões, os bolores foram identificados através da observação directa do substrato à lupa (Cahagnier e Poisson, 1982), logo que o reactor era retirado do banho. Estes resultados foram comparados com a identificação de bolores isolados em placas, conforme método anterior.

4.5 Métodos de cálculo

A variação dos resultados (Δ), foi determinada pela expressão

$$\Delta (\%) = \frac{\text{amplitude de variação}}{\text{média}} \times 100$$

A concentração de sólidos voláteis (SV), foi determinada a partir dos resultados da determinação de cinza total (CN, em %), pela expressão

$$\text{SV} (\%) = 100 - \text{CN}$$

A taxa de produção de CO₂ foi calculada a partir da medição (mássica) do caudal de ar (Q, ml/min) e da concentração de CO₂ (% v/v), no ar de saída dos reactores, pela expressão

$$\text{CO}_2 (\text{g/h}) = \frac{Q \times 60 \times (\text{CO}_2 - 0.03) \times 44}{10^5 \times 22.4}$$

A produção acumulada de CO₂ num determinado momento (t) corresponde ao somatório das taxas de produção de CO₂ medidas entre t=0h e t=t e é expressa em gramas.

Optou-se, por motivos que serão apresentados posteriormente, por não dividir a taxa de produção de CO₂ pela quantidade inicial de substrato.

A redução de peso seco (RPS), de sólidos voláteis (RSV), de carbono (Rcarbono), de azoto (Razoto), de amido (RA), de hemicelulose (RH), de celulose (RC) ou de lenhina (RL) é a diferença entre o momento t=0h e o momento t expressa em grama ou em percentagem do valor inicial.

5. RESULTADOS. APRESENTAÇÃO

A composição da casca, farinha escura e farinha branca utilizadas na produção do substrato é apresentada no Quadro 5.1.

Quadro 5.1- Composição dos componentes do substrato

Composição	Casca (%ps)	Farinha escura (%ps)	Farinha branca (%ps)
Cinza total	15.0	14.6	2.1
Lenhina	12.0	6.2	0.3
Celulose	28.4	14.3	0.4
Hemicelulose	17.0	21.8	1.1
Amido	8.7	17.8	88.9
Matéria gorda	0.2	0.7	0.7
Proteína bruta	4.0	7.0	11.0
Não identificados	14.7	17.6	

Para análise do comportamento da temperatura, apresenta-se na Figura 5.1 a evolução das temperaturas medidas no ponto de coordenadas (0,10) do reactor de comando e no banho, bem como, na Figura 5.2, a variação no interior do reactor, conforme o procedimento descrito no §4.3.1 "Temperatura". A média das diferenças entre temperaturas de pontos distintos foram incluídas na Figura 5.2. Na Figura 5.3 apresenta-se a variação da temperatura do banho nos ensaios realizados e na Figura 5.4 a temperatura do banho e do substrato nos ensaios preliminares em que se fixou a primeira destas temperaturas.

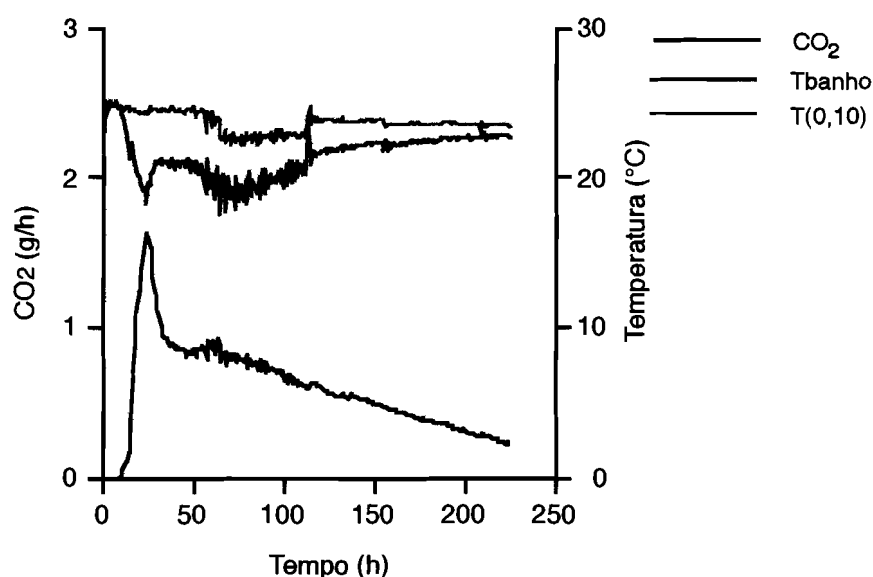


Figura 5.1- Temperatura no ensaio EI.4 (25°C)

5. Resultados. Apresentação

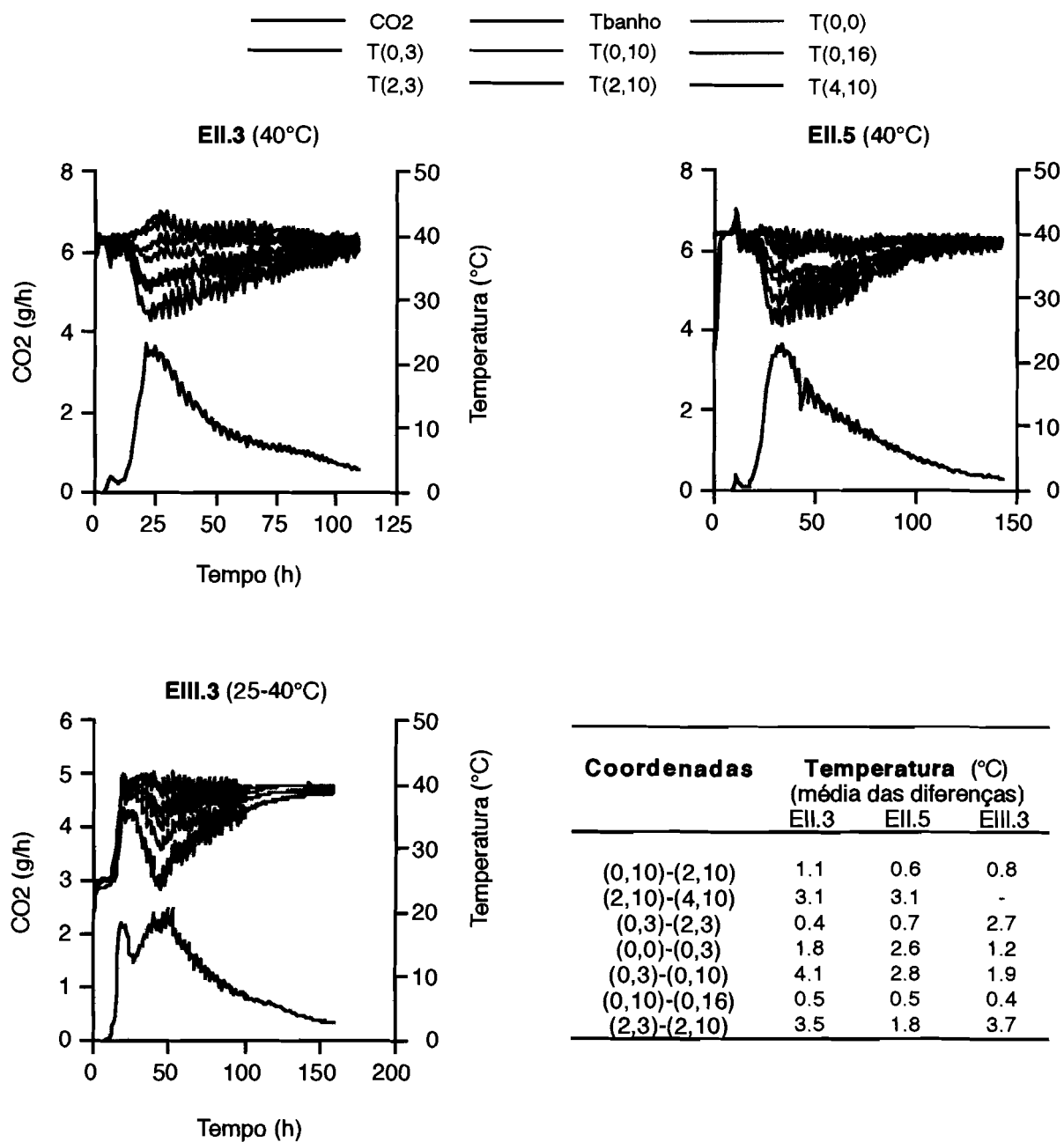


Figura 5.2- Temperatura nos ensaios EII.3 e EII.5 (40°C) e ensaio EIII.3 (25-40°C)

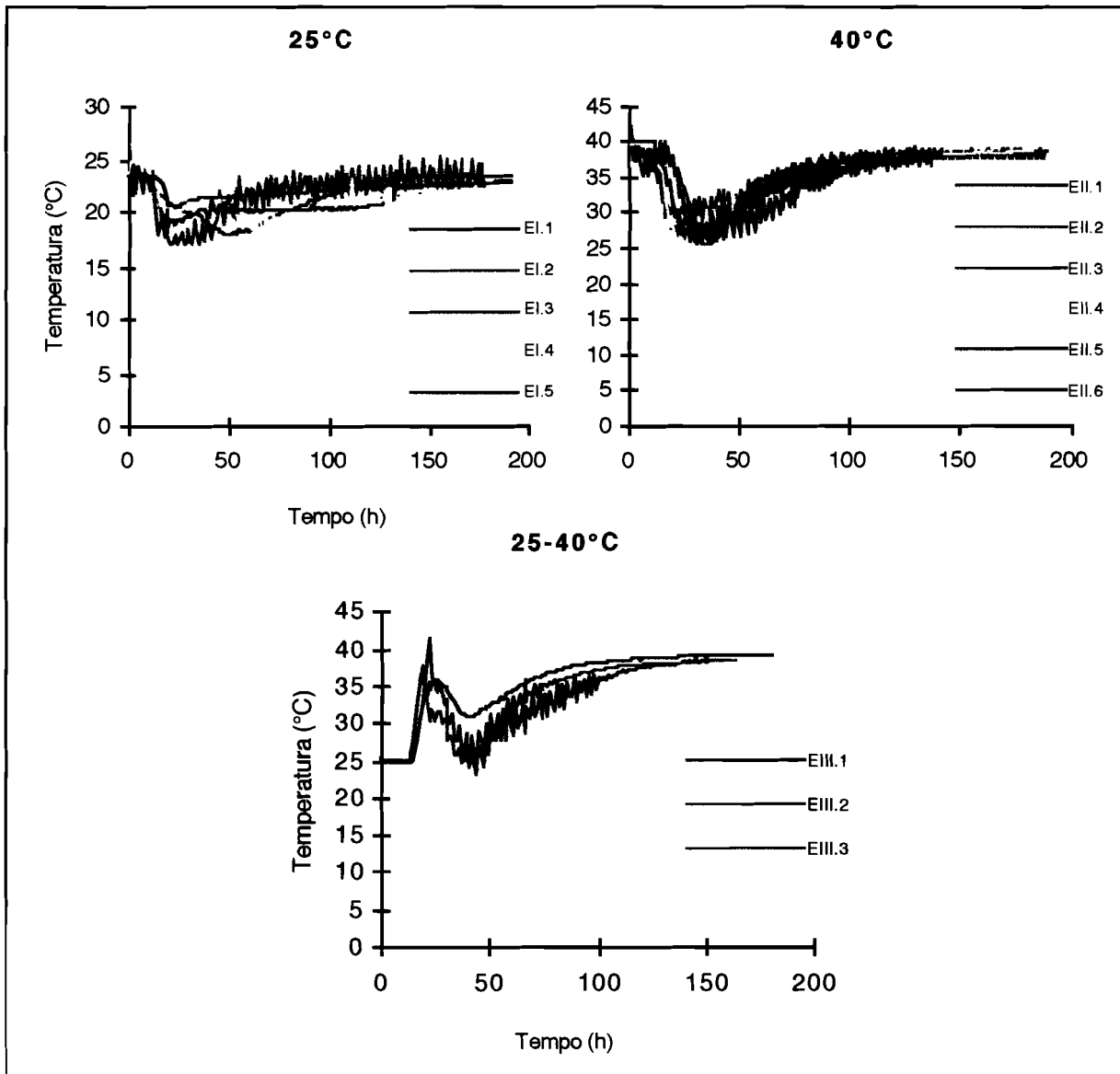


Figura 5.3- Temperatura do banho nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C

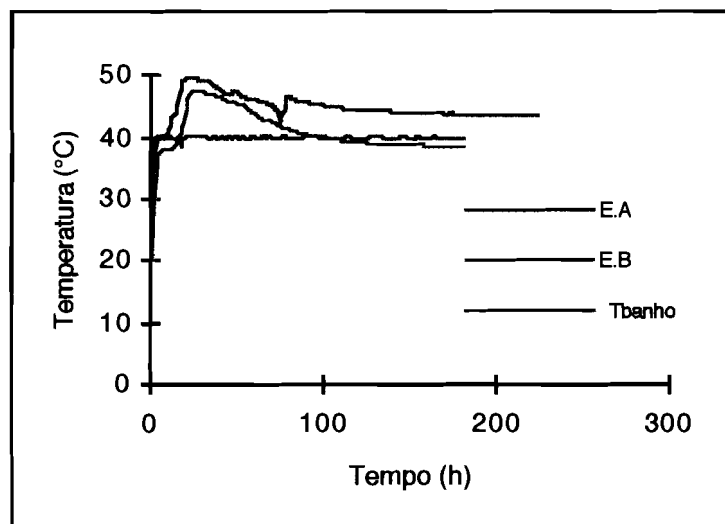


Figura 5.4- Temperatura nos ensaios preliminares

5. Resultados. Apresentação

Para a análise da reprodutibilidade no funcionamento da instalação piloto de compostagem apresenta-se, na Figura 5.5, a evolução da taxa de produção de CO_2 dos vários reactores no ensaio EI.1 (25°C), bem como a produção acumulada de CO_2 nos ensaios que terminaram com mais de um reactor, designados por R_i , com i variável de 1 a 5.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 apresenta-se a evolução da taxa de produção de CO_2 sempre que se procedeu à repetição dos ensaios e na Figura 5.8 estes resultados foram convertidos na produção acumulada de CO_2 , e sendo apresentados em conjunto com a quantidade de substrato usada em cada ensaio.

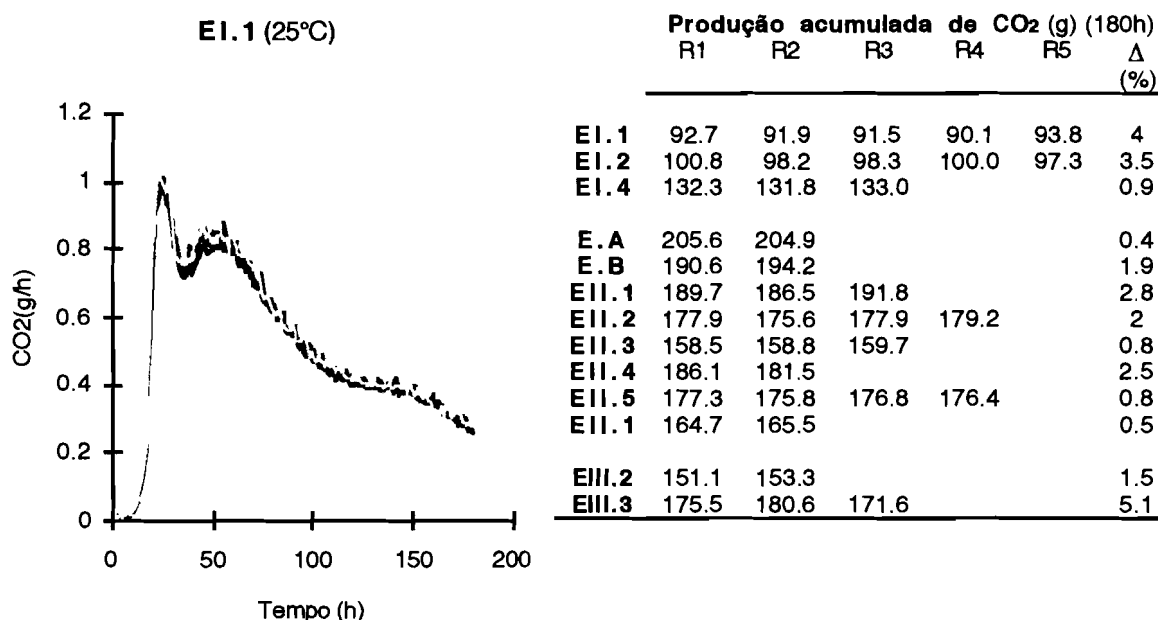


Figura 5.5- Evolução da taxa de produção de CO_2 no ensaio EI.1 (25°C) e produção acumulada de CO_2

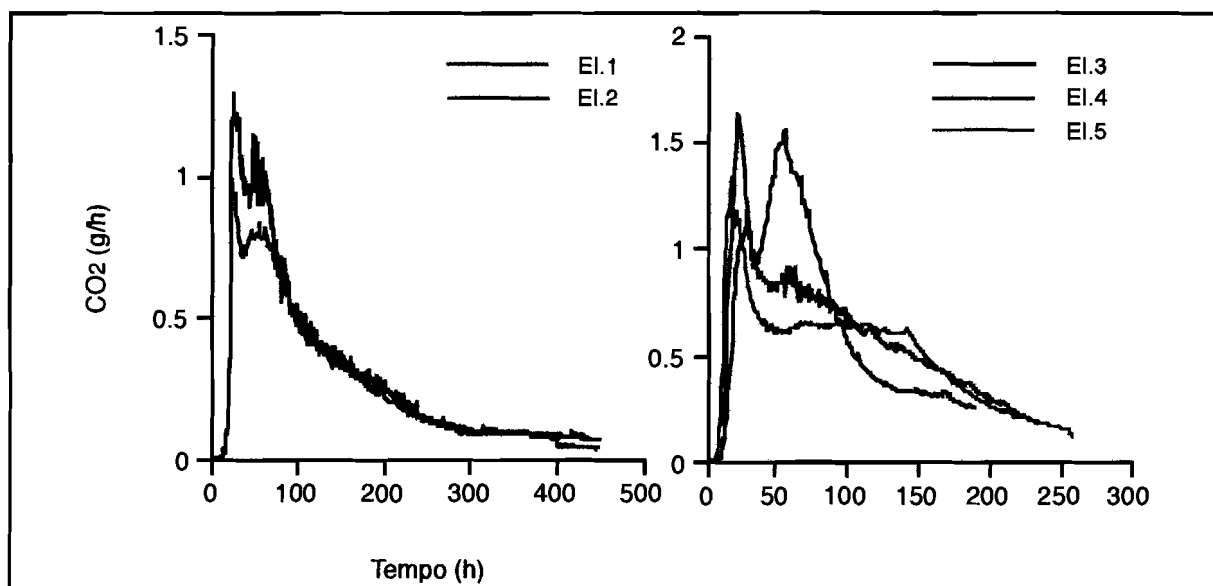


Figura 5.6- Evolução da taxa de produção de CO_2 nos ensaios a 25°C

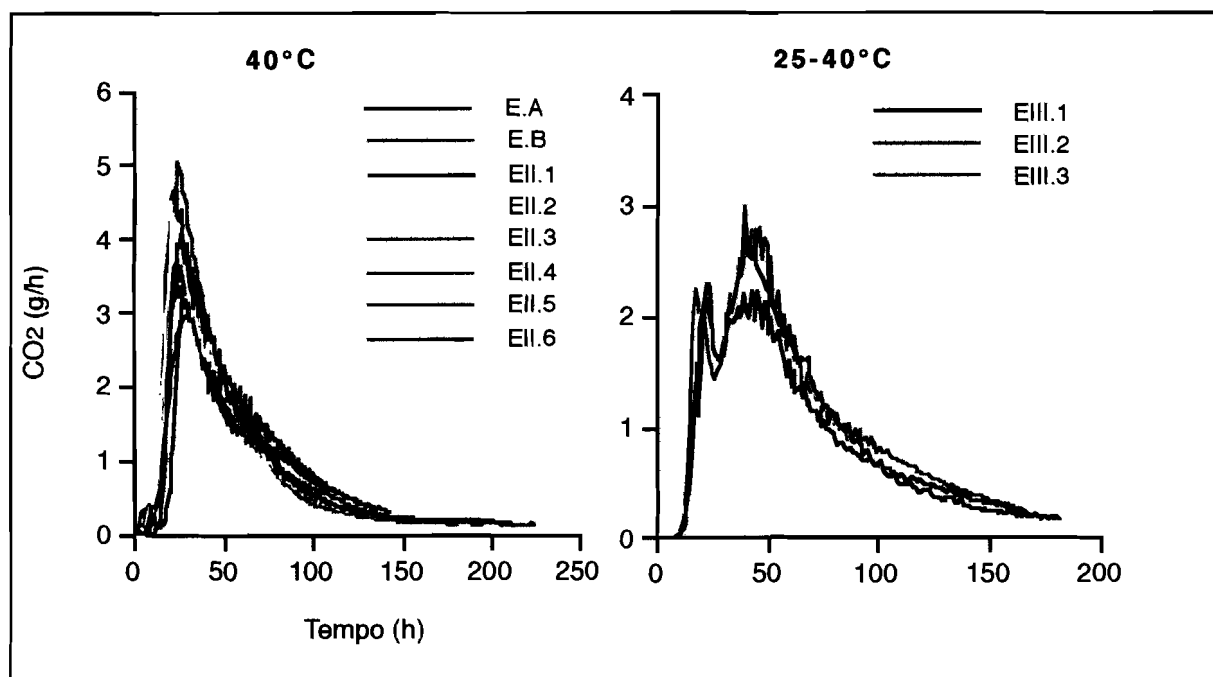


Figura 5.7- Evolução da taxa de produção de CO₂ nos ensaios a 40°C e 25-40°C

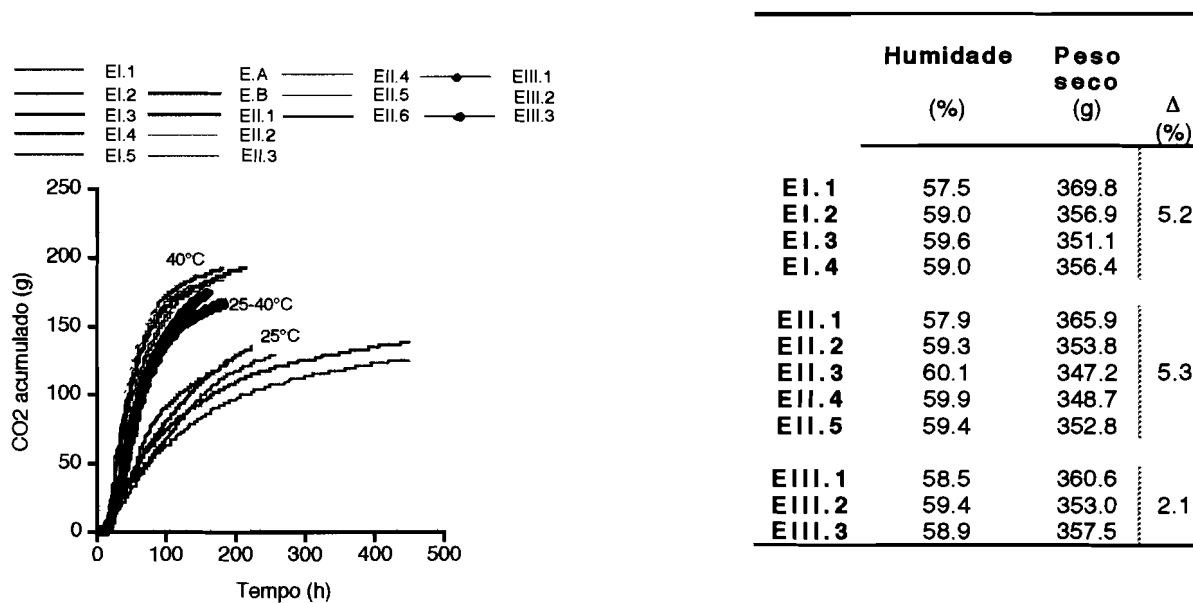


Figura 5.8 - Evolução da produção acumulada de CO₂ nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C

5. Resultados. Apresentação

A evolução do substrato em compostagem é apresentada nos Quadros 5.2 e 5.3 que incluem, para além do pH, humidade, produção acumulada de CO₂, peso húmido e sólidos voláteis, respectivamente, a análise elementar e a concentração de amido, hemicelulose, celulose e lenhina.

Quadro 5.2- Composição elementar

Ensaio	Tempo (h)	pH	Humidade (%)	CO ₂ ac (g)	p.húmido (g)	SV (%)	Carbono (%)	Azoto (%)	Hidrogénio (%)
E.B	0	5.7	59.0	0	870.0	87.1	42.88	1.15	5.98
	36	5.6	62.3	80.3	800.4	85.3	42.86	1.41	5.61
	65	6.5	62.5	145.1	742.8	84.2	41.33	1.40	5.30
	88	6.9	61.6	167.3	697.3	83.2	40.83	1.45	5.34
	180	7.4	61.9	190.6	663.8	82.6	39.93	1.40	5.21
	180	7.4	61.8	194.2	654.5	82.4	40.29	1.41	5.19

Os efeitos da adição suplementar de amido sob a forma de farinha branca no início e na fase final do processo de compostagem são mostrados na Figura 5.9.

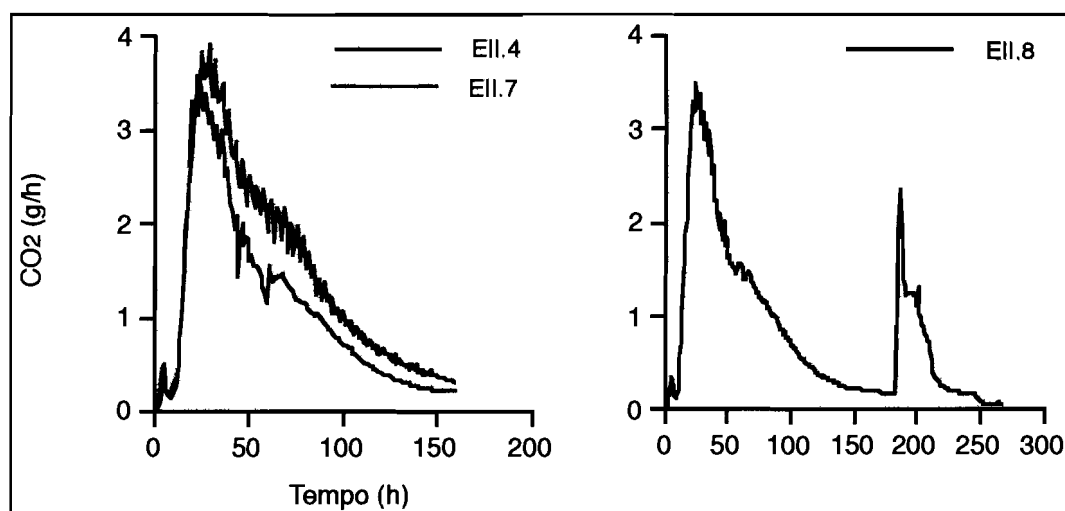


Figura 5.9- Adição suplementar de amido (40°C)

Para a avaliação de condições heterogêneas de degradação apresenta-se, nos Quadros 5.4 a 5.6, os resultados das determinações de humidade, cinza total e amido em diversos locais do substrato em compostagem, conforme procedimento descrito no §4.3.2 "Amostras sólidas". No Quadro 5.7 apresenta-se o peso relativo das fracções de onde provêm as amostras para as análises anteriores.

Quadro 5.3- Evolução do substrato

Ensaio	Tempo (h)	pH	Humidade (%)	C O ₂ ac (g)	p.húmido (g)	S V (%)	Amido (%)	Hemic. (%)	Celulose (%)	Lenhina (%)
EI.3 (25°C)	0	5.7	59.6	0	870.0	88.1	20.9	29.6	24.0	9.8
	15	4.3	56.5	1.2	797.8	86.8	19.2	30.6		
	23	4.7	57.2	7.5	794.1	87.6	19.7	31.0		
	46		59.1	33.5	790.6	86.8	14.8	29.1		
	94		61.1	87.4	754.4	85.3	4.4	24.4	32.5	12.5
	161	5.9	62.6	113.4	745.1	84.4	2.8	21.7		
	190	6.2	61.3	121.2	707.9	83.7	2.6	21.3		
EI.4 (25°C)	0	5.5	59.0	0	870.0	87.4	21.7	26.2	23.3	8.4
	33	5.2	58.1	23.8	796.2	86.5	18.3	26.7		
	60		57.0	48.4	758.0	86.0	16.0	22.6		
	88		59.1	72.3	772.6	85.3	11.4	22.5		
	225		59.3	132.3	690.4	83.6	3.6	22.1		
	225	6.2	63.3	131.8	754.2	83.1	3.2	23.1	31.2	10.4
	225	6.1	61.3	132.3	717.6	83.5	3.3	21.8		
EII.4 (40°C)	0	5.9	59.9	0	870.0	87.4	19.8	26.5	21.5	10.6
	11	3.9	56.6	1.8	813.4	86.8	18.9	28.6		
	19	4.3	57.5	11.5	820.0	86.6	18.3	23.5		
	39	4.8	62.3	71.0	810.6	84.6	6.0	21.5		
	64	5.5	63.8	114.7	793.2	83.0	2.6	23.4		
	183	7.2	63.1	186.1	664.7	81.5	1.3	21.2	20.9	10.3
	183	7.1	62.0	181.5	650.4	81.1	1.2			
EIII.1 (25-40°C)	0	5.8	58.5	0	870.0	87.1	20.1	32.7	18.2	14.5
	37	5.0	56.4	44.3	754.4	85.8	13.2	26.5		
	66	5.7	58.5	104.7	714.5	84.2	5.9	23.8		
	137	7.1	61.2	148.7	701.9	82.7	2.2	22.5		
	181	7.3	58.9	164.7	631.7	81.8	2.4	22.0	29.5	16.3
	181		58.2	165.5	623.2		1.5			
EIII.3 (25-40°C)	0	5.9	58.9	0	870.0	87.0	21.0	32.1	23.3	9.5
	18	4.8	57.1	7.1	798.3	86.7	18.1	34.9		
	39		57.4	48.3	769.1	86.0	13.3	23.3		
	62		62.0	105.7	789.9	84.4	4.9	23.5		
	160		60.9	175.5	677.8	82.5	2.1	22.2	32.7	14.5
	160	7.2	62.8	180.6	690.7	82.1	1.7	22.3		
	160		64.3	171.6	766.1	82.1	1.7	22.7		
EII.7 (40°C)	0	6.0	59.7	0	980	88.5	25.8	29.7	20.9	8.3
	163	3.9	67.3	238.0	755.4	81.6	1.0	24.8		
	163	4.3	68.1	238.4	749.1	81.8	1.3	21.9	30.7	16.0
	163	4.8	65.2	239.0	714.8	81.5	1.2	23.8		
	163	5.5	67.0	233.7	768.9	82.0	1.2	23.2		
E.A	0	6.0	59.3	0	870.0	87.9	22.0	30.8	23.6	10.6
	9	5.0	57.1	0.4	816.8	87.6	20.5	29.8		
	29	5.2	62.3	59.2	820.9	85.4	6.9	21.4		
	224	7.7	57.9	204.9	563.7		1.4	22.8		
	224	7.8	60.2	205.6	593.0	81.4	1.6	21.7	29.5	16.1

Quadro 5.4- Humidade em diversos locais do substrato em compostagem^(*)

EII.4 (40°C) (%)				EI.4 (25°C) (%)			
(11h)	Interior	Meio	Exterior	(60h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	53.6	55.2	55.3	Topo	54.1	55.9	57.0
Intermédio 1	56.1	56.6	55.9	Intermédio 1	52.3	54.0	55.6
Intermédio 2	57.5	57.7	56.5	Intermédio 2	54.1	55.3	56.0
Fundo	59.7	60.1	58.2	Fundo	62.2	63.6	61.0
(19h)	Interior	Meio	Exterior	(88h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	54.7	53.9	55.0	Topo	52.9	56.7	60.9
Intermédio 1	55.3	55.4	56.9	Intermédio 1	48.9	50.5	49.0
Intermédio 2	57.8	57.8	57.3	Intermédio 2	51.4	53.5	56.1
Fundo	64.5	64.5	63.1	Fundo	70.1	69.9	71.2
(39h)	Interior	Meio	Exterior	(225h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	55.5	56.8	63.5	Topo	51.9	59.5	63.3
Intermédio 1	59.3	60.7	62.6	Intermédio 1	46.3	50.7	57.1
Intermédio 2	63.5	64.3	66.0	Intermédio 2	47.4	53.1	56.2
Fundo	65.5	67.4	70.1	Fundo	70.8	73.2	71.1
(64h)	Interior	Meio	Exterior	EIII.3 (25-40°C) (%)			
Topo	58.7	61.9	67.7	(39h)	Interior	Meio	Exterior
Intermédio 1	56.8	60.1	63.3	Topo	50.2	51.3	52.3
Intermédio 2	63.4	64.3	67.7	Intermédio 1	49.7	52.3	53.2
Fundo	67.7	69.7	69.3	Intermédio 2	55.7	57.5	55.8
(183h)	Interior	Meio	Exterior	Fundo	68.9	69.2	69.3
Topo	46.6	55.0	59.7	(62h)	Interior	Meio	Exterior
Intermédio 1	50.1	61.3	66.8	Topo	46.1	48.0	60.0
Intermédio 2	64.3	57.3	66.0	Intermédio 1	40.8	49.7	60.4
Fundo	73.3	71.3	70.0	Intermédio 2	62.1	62.7	68.1
				Fundo	76.6	77.5	78.2
				(159h)	Interior	Meio	Exterior
				Topo	51.3	44.4	43.0
				Intermédio 1	29.8	38.1	56.2
				Intermédio 2	49.6	52.5	47.9
				Fundo	74.6		

^(*) Assinala-se de forma diferenciada os valores de humidade distintos do conjunto (§6.2.3)

Quadro 5.5- Sólidos voláteis em diversos locais do substrato em compostagem

EII.4 (40°C) (%ps)				EI.4 (25°C) (%ps)			
(11h)	Interior	Meio	Exterior	(60h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	86.8	86.6	86.5	Topo	85.7	86.1	86.4
Intermédio 1	86.7	86.9	86.7	Intermédio 1	85.7	85.9	86.2
Intermédio 2	86.4	87.1	86.3	Intermédio 2	85.8	86.1	86.3
Fundo	86.6	86.7	-	Fundo	85.9	85.9	86.3
(19h)	Interior	Meio	Exterior	(88h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	86.5	86.6	86.3	Topo	84.7	85.0	85.7
Intermédio 1	86.5	87.9	86.5	Intermédio 1	84.7	85.1	85.5
Intermédio 2	87.4	86.6	87.5	Intermédio 2	84.4	85.2	85.7
Fundo	86.7	86.7	87.4	Fundo	85.5	85.9	85.9
(39h)	Interior	Meio	Exterior	(225h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	84.8	85.1	85.3	Topo	83.3	83.4	83.6
Intermédio 1	84.0	84.2	86.2	Intermédio 1	83.3	83.8	83.9
Intermédio 2	84.0	85.3	86.2	Intermédio 2	83.5	83.5	84.1
Fundo	84.4	85.3	85.7	Fundo	83.1	83.4	84.0
(64h)	Interior	Meio	Exterior	EIII.3 (25-40°C) (%ps)			
Topo	83.3	84.0	84.5	(39h)	Interior	Meio	Exterior
Intermédio 1	83.8	83.2	84.8	Topo	86.0	84.7	85.9
Intermédio 2	82.4	83.1	83.6	Intermédio 1	88.0	86.4	86.6
Fundo	84.1	83.1	82.9	Intermédio 2	85.6	86.1	85.9
(183h)	Interior	Meio	Exterior	Fundo	85.1	85.3	86.0
Topo	83.8	81.5	-	(62h)	Interior	Meio	Exterior
Intermédio 1	79.3	81.6	81.4	Topo	86.1	84.0	85.2
Intermédio 2	-	81.2	82.3	Intermédio 1	84.1	84.4	84.8
Fundo	-	82.4	83.0	Intermédio 2	83.8	84.1	85.3
				Fundo	83.9	84.4	84.4
				(159h)	Interior	Meio	Exterior
				Topo	83.1	83.4	83.8
				Intermédio 1	82.9	82.8	83.0
				Intermédio 2	82.3	82.0	82.7
				Fundo		82.2	

Quadro 5.6- Amido em diversos locais do substrato em compostagem(*)

EII.4 (40°C) (%ps)				EI.4 (25°C) (%ps)			
(11h)	Interior	Meio	Exterior	(60h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	18.7	20.7	16.8	Topo	12.9	15.4	16.8
Intermédio 1	19.8	19.0	18.0	Intermédio 1	13.4	16.0	17.3
Intermédio 2	20.0	19.4	18.0	Intermédio 2	15.1	16.8	15.9
Fundo	18.6	20.1	17.8	Fundo	16.9	16.7	17.9
(19h)	Interior	Meio	Exterior	(88h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	16.5	17.8	16.9	Topo	9.6	10.7	12.3
Intermédio 1	19.5	18.4	18.5	Intermédio 1	7.0	9.4	13.2
Intermédio 2	18.5	18.6	18.8	Intermédio 2	7.8	10.7	12.7
Fundo	19.3	19.4	17.1	Fundo	14.0	14.5	14.8
(39h)	Interior	Meio	Exterior	(225h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	4.5	5.0	7.5	Topo	3.1	3.4	3.7
Intermédio 1	3.0	5.9	7.9	Intermédio 1	3.2	3.4	3.8
Intermédio 2	2.7	5.9	7.4	Intermédio 2	3.4	3.1	4.1
Fundo	6.3	7.6	7.9	Fundo	3.9	4.1	4.6
(64h)	Interior	Meio	Exterior	EIII.3 (25-40°C) (%ps)			
Topo	1.8	2.7	3.2	(39h)	Interior	Meio	Exterior
Intermédio 1	1.7	2.3	2.7	Topo	13.8	14.8	16.2
Intermédio 2	2.0	2.6	3.0	Intermédio 1	12.1	14.4	15.7
Fundo	2.2	2.9	3.7	Intermédio 2	10.0	14.0	14.4
(183h)	Interior	Meio	Exterior	Fundo	9.5	9.7	12.8
Topo	1.5	1.4	1.3	(62h)	Interior	Meio	Exterior
Intermédio 1	1.5	1.5	1.3	Topo	4.3	5.3	7.2
Intermédio 2	1.1	1.1	1.2	Intermédio 1	4.3	5.0	6.6
Fundo	1.6	1.1	1.3	Intermédio 2	3.3	4.6	5.7
				Fundo	3.2	4.0	4.7
				(159h)	Interior	Meio	Exterior
				Topo	2.4	2.4	3.3
				Intermédio 1	2.2	2.5	2.8
				Intermédio 2	1.9	2.0	2.8
				Fundo	1.5		

(*) Assinala-se de forma diferenciada os gradientes de degradação de amido (§9.2)

Quadro 5.7- Peso relativo do substrato em compostagem(*)

EII.4 (40°C) (%ps)				EI.4 (25°C) (%ps)			
(11h)	Interior	Meio	Exterior	(60h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	3.3	36.5	3.1	Topo	3.1	20.4	5.3
Intermédio 1	4.1	10.5	2.3	Intermédio 1	5.1	12.0	7.2
Intermédio 2	7.6	14.3	2.4	Intermédio 2	7.7	11.3	6.6
Fundo	3.6	10.2	2.1	Fundo	3.9	13.1	4.3
(19h)	Interior	Meio	Exterior	(88h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	9.0	14.3	6.3	Topo	7.1	15.5	6.8
Intermédio 1	11.2	9.4	4.8	Intermédio 1	6.0	10.6	7.0
Intermédio 2	8.5	10.2	6.4	Intermédio 2	5.4	10.7	8.6
Fundo	8.2	7.0	4.8	Fundo	5.1	8.8	8.3
(39h)	Interior	Meio	Exterior	(225h)	Interior	Meio	Exterior
Topo	10.5	14.0	7.7	Topo	9.7	14.3	8.3
Intermédio 1	10.8	12.8	5.3	Intermédio 1	5.7	13.4	5.6
Intermédio 2	9.3	8.7	5.9	Intermédio 2	5.3	12.6	7.4
Fundo	4.9	6.8	3.4	Fundo	4.2	8.3	5.0
(64h)	Interior	Meio	Exterior	EIII.3 (25-40°C) (%ps)			
Topo	9.7	10.3	7.0	(39h)	Interior	Meio	Exterior
Intermédio 1	8.1	13.3	7.9	Topo	5.9	11.8	5.3
Intermédio 2	9.3	11.4	5.7	Intermédio 1	8.1	14.1	6.5
Fundo	4.8	8.6	3.8	Intermédio 2	7.7	15.6	7.1
(183h)	Interior	Meio	Exterior	Fundo	3.7	8.6	5.6
Topo	10.2	11.8	5.8	(62h)	Interior	Meio	Exterior
Intermédio 1	9.0	14.0	6.6	Topo	5.9	16.8	5.1
Intermédio 2	5.1	12.6	8.0	Intermédio 1	5.3	15.4	6.5
Fundo	3.7	7.8	5.5	Intermédio 2	7.6	14.4	7.4
				Fundo	4.2	6.9	4.6
				(159h)	Interior	Meio	Exterior
				Topo	5.3	6.8	3.1
				Intermédio 1	4.4	13.7	7.1
				Intermédio 2	9.9	12.5	4.9
				Fundo		10.8	

(*) Assinala-se de forma distinta os locais onde a concentração de amido é idêntica (§9.2)

5. Resultados. Apresentação

No que diz respeito à caracterização microbiológica, apresenta-se no Quadro 5.8 os resultados de contagens de colónias de bactérias e bolores nos ensaios EI.4 (25°C), EII.4 (40°C) e EIII.3 (25-40°C).

Quadro 5.8- Número de microrganismos

Tempo (h)	Bactérias (u.f.c./g ps)			Bolores (u.f.c./g ps)		
	EI.4	EII.4	EIII.3	EI.4	EII.4	EIII.3
0	2.3x10 ³	3.2x10 ²	1.3x10 ³	9.4x10 ¹	<9.2x10 ¹	<9.5x10 ¹
11		6.5x10 ⁵			1.5x10 ²	
18			2.1x10 ⁷			<9.3x10 ¹
19		1.9x10 ⁶			4.5x10 ³	
33	9.4x10 ⁷			1.8x10 ²		
39		7.0x10 ⁶	1.8x10 ⁸		4.5x10 ⁵	9.9x10 ³
60	5.2x10 ⁸			1.6x10 ⁶		
64		1.2x10 ⁸			6.2x10 ⁴	
88	4.3x10 ⁸			3.6x10 ⁶		
159			2.3x10 ⁸			5.2x10 ⁵
183		7.8x10 ⁸			1.4x10 ⁶	
225	3.4x10 ⁸			5.4x10 ⁶		

A flora microbiana no substrato, no início a 25°C, era constituída, para além de bactérias e leveduras, pelos seguintes bolores: *Mucor* sp. (*Mucor hiemalis* e *Mucor racemosus*), *Penicillium* sp., *Rhizopus* sp., *Syncephalastrum* sp., e *Geotrichum* sp. (pontualmente). Nas placas incubadas a 40°C não cresciam bolores.

A constatação da alteração do aspecto macroscópico dos reactores durante o processo de compostagem é mostrada na Figura 5.10: o substrato que inicialmente era castanho ficava numa fase posterior coberto de micélio. A observação sistemática deste fenómeno permitiu verificar que, tanto nos ensaios em condições de temperatura fixa (25°C e 40°C) como de temperatura variável (25-40°C), a cor do substrato mantinha-se inalterada durante o desenvolvimento do primeiro máximo de CO₂, enquanto que o segundo máximo de CO₂ coincidia com o facto dos reactores ficarem cobertos de micélio, cinzento a 25°C e branco a 40°C.

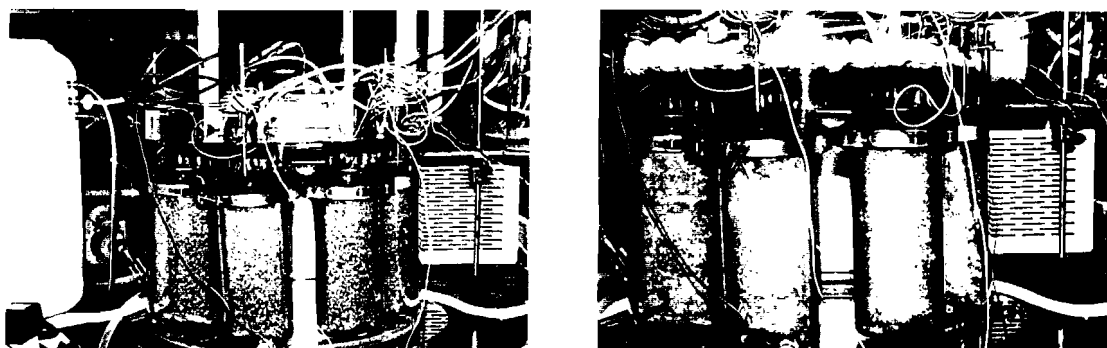


Figura 5.10- Alteração do aspecto macroscópico do substrato em compostagem

Os bolores identificados durante os ensaios de compostagem, por observação directa de amostras retiradas imediatamente após a saída dos reactores do banho termostatzado, à lupa com apoio microscópico, são apresentados no Quadro 5.9 e Figura 5.11.

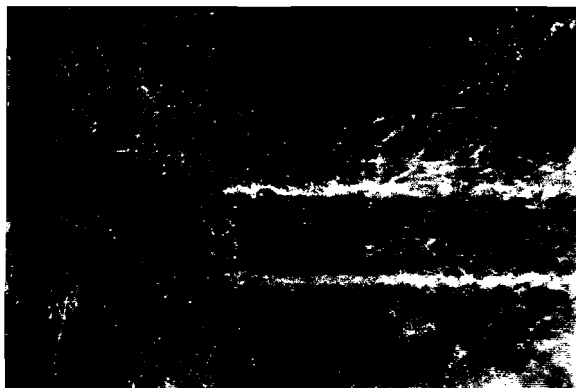
Quadro 5.9 - Identificação de bolores(*)

Tempo (h)	EI.5	EII.6
8		ausência de bolores
14		Micélio vegetativo+++ Mucorales (<i>Syncephalastrum</i> sp.++, <i>Mucor racemosus</i> +))
37		Micélio vegetativo+++ Mucorales (<i>Syncephalastrum</i> sp.++, <i>Rhizopus</i> sp.++, <i>Mucor racemosus</i> +)) <i>Aspergillus fumigatus</i> +
59	Mucorales+++ (<i>Mucor hiemalis</i> , <i>Mucor racemosus</i>) Micélio vegetativo+ <i>Penicillium</i> sp.+	
111		<i>Aspergillus</i> sp.+++ (<i>Aspergillus fumigatus</i>) Mucorales+ (<i>Syncephalastrum</i> sp., <i>Rhizopus</i> sp.)
132	<i>Penicillium</i> sp.+++ Mucorales+ (<i>Mucor</i> sp. com clamidósporos, <i>Thamnidium</i> sp.)	
260	<i>Penicillium</i> sp.++ <i>Aspergillus</i> sp.+ (<i>Aspergillus niger</i>) Mucorales+ (<i>Mucor</i> sp. com clamidósporos, <i>Thamnidium</i> sp., <i>Rhizopus</i> sp.)	

Simultaneamente, nos plaqueamentos realizados durante o ensaio EI.5 (25°C), assinala-se o desenvolvimento de:

- bactérias, leveduras, *Mucor racemosus*, *Mucor hiemalis*, *Penicillium* sp., *Fusarium* sp., *Zygorhynchus* sp., após 59 horas de compostagem
- bactérias, leveduras, *Mucor racemosus*, *Mucor hiemalis*, *Penicillium* sp., *Thamnidium* sp., *Rhizopus* sp., após 132 horas de ensaio.

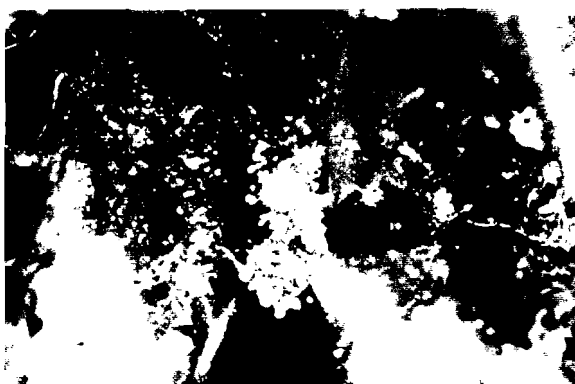
(*) Presença dominante +++; presença dispersa ++; presença +



Micélio vegetativo



Mucor racemosus



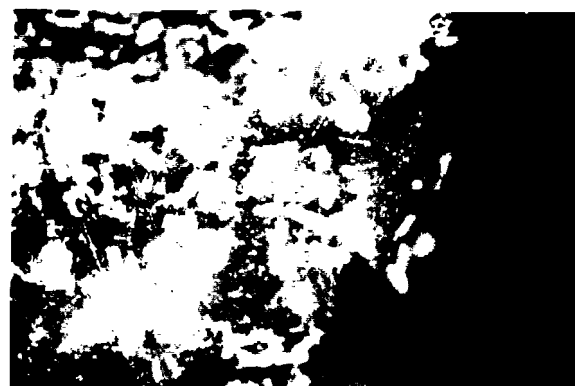
Penicillium sp.



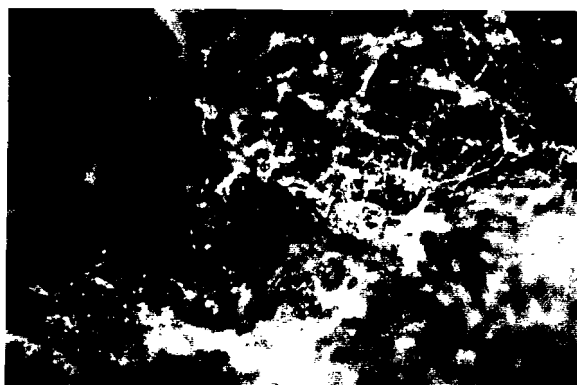
Penicillium sp.



Aspergillus niger



Aspergillus fumigatus



Rhizopus sp.



Syncephalastrum sp.

Figura 5.11- Aspecto dos bolores identificados (observação à lupa, x250)

6. CARACTERIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA INSTALAÇÃO PILOTO DE COMPOSTAGEM

6.1 Objectivos

O presente capítulo tem por objectivo a análise do comportamento da instalação piloto de compostagem, em regime de temperatura fixa (25 e 40°C) e temperatura variável (25-40°C), no que respeita a:

- fiabilidade, com base no balanço de carbono,
- reprodutibilidade, com base na produção de CO₂, em diversos reactores simultaneamente presentes num mesmo ensaio ou na repetição de ensaios nas mesmas condições,
- variação da temperatura, humidade e pH do substrato com o tempo,
- variação espacial da temperatura e humidade.

6.2 Análise dos resultados e discussão

6.2.1 Fiabilidade e reprodutibilidade

A quantidade de carbono libertado sob a forma de CO₂, resultante da actividade dos microrganismos no ensaio preliminar E.B (Quadro 5.2), é idêntica à redução de carbono calculada com base na evolução da composição elementar do substrato, o que traduz a fiabilidade do funcionamento da instalação piloto de compostagem (Quadro A.I.1).

Comparando vários reactores em cada ensaio, verifica-se uma variação inferior a 5% das produções acumuladas de CO₂ e a sobreposição das respectivas evoluções da taxa de produção de CO₂ (Figura 5.5). Deste modo, foi possível seleccionar reactores em momentos intermédios do ensaio e determinar a composição do respectivo substrato.

A variação na produção de CO₂, sempre que se procedeu à repetição dos ensaios, é apresentada nas Figuras 5.6 a 5.8. Apesar de se ter usado sempre 870g de substrato, a humidade inicial nunca foi exactamente 60.0% (Figura 5.8). Calculou-se que, na repetição de ensaios, a produção acumulada de CO₂ pode ter tido uma variação da mesma ordem de grandeza que a variação da produção entre reactores num mesmo ensaio, pelo facto da quantidade inicial de substrato não ter sido exactamente igual (Figura 5.5).

6.2.2 Temperatura

Quando se fixa a temperatura do ensaio, seja a 25°C ou a 40°C, ou nos ensaios a temperatura variável (25-40°C), na fase de temperatura fixa, verifica-se que, no reaktor de comando e no local de controlo (0,10), a temperatura varia em torno da temperatura definida, afastando-se no máximo 2°C (valor absoluto) (figuras 5.1 e 5.2). Mas, para manter a temperatura constante neste local, o banho arrefece e provoca o desenvolvimento de gradientes de temperatura na horizontal.

Nos ensaios Ell.3 e Ell.5, a dez centímetros de altura, a média das diferenças entre as temperaturas do interior (0,10) e do meio (2,10) é de 1°C e entre esta zona e a exterior (4,10) é de 3°C (Figura 5.2). A temperatura, a três centímetros de altura, no interior (0,3) é praticamente igual à temperatura no meio (2,3). No ensaio EIII.3, a diferença entre o interior e o meio é de 1°C e de 3°C, respectivamente, a dez e três centímetros de altura.

Além destes gradientes horizontais, seria de esperar o desenvolvimento de gradientes de temperatura verticais, no sentido do arejamento, como efectivamente se verifica no ensaio EIII.3, mas nos ensaios Ell.3 e Ell.5, observa-se uma inversão no interior, a três centímetros de altura, relativamente ao fundo. Considerando o gradiente de temperatura na horizontal e a inversão do gradiente vertical, conclui-se que as perdas de calor por condução são importantes (Papadimitriou e Balis 1996, Hogan *et al.* 1989). A média das diferenças entre as temperaturas medidas nos pontos (0,3) e (0,10) e nos pontos (2,3) e (2,10) está compreendida, nos três ensaios, no intervalo de 2 a 4°C. A temperatura no interior acima do ponto (0,10) praticamente não varia, como se verifica comparando a diferença entre os pontos (0,10) e (0,16).

Embora a temperatura no ponto de controlo do sistema e na vertical superior seja praticamente sempre de 40°C, ao longo dos ensaios, constata-se que nos locais mais afastados destas condições, os pontos (0,3), (2,3) e (4,10) nos ensaios Ell.3 e Ell.5 e os pontos (0,0) e (2,3) no ensaio EIII.3, a temperatura no início é de 38-40°C, reduz-se até 29-33°C e aumenta novamente até atingir 38-40°C na fase final do processo de compostagem. No ponto (2,3), no ensaio EIII.3, a temperatura desce até 26°C. A temperatura média nestes pontos está contida no intervalo 35-37°C.

Embora as médias das diferenças sejam da mesma ordem de grandeza, o gradiente horizontal é mais importante que o vertical porque o primeiro se verifica em 4.5 centímetros, enquanto que o segundo é relativo a uma distância de 23 centímetros. De qualquer forma, os gradientes de temperatura importantes estão

limitados no tempo, embora coincidam com os momentos em que a taxa de produção de CO_2 é mais elevada (Figuras 5.1 e 5.2).

Nos ensaios EII.3 e EII.5, a temperatura nos diferentes locais do substrato em compostagem é semelhante, em consequência de idêntica evolução da taxa de produção de CO_2 , da temperatura no ponto de comando e da temperatura do banho (Figura 6.1).

A variação da temperatura nos ensaios 25-40°C é semelhante à dos ensaios a 40°C, com a excepção da inversão que se verifica depois do momento em que se fixa a temperatura (Figura 5.2). Na fase anterior, as diferenças em valor absoluto são inferiores a 1°C. Campbell *et al.* (1990) fixaram a diferença entre a temperatura do substrato e do exterior em resultado da precisão da medição e de gradientes observados.

As temperaturas do banho em ensaios repetidos são idênticas (Figura 5.3). Mesmo nos ensaios a temperatura variável, a temperatura do banho comporta-se como nos ensaios a 40°C a partir do momento em que se fixa a temperatura. A diferença entre a temperatura definida para o ensaio, ou a temperatura do substrato no ponto (0,10), e a temperatura do banho, pode ser usada como uma medida por excesso do gradiente de temperatura. Apesar de não ter sido medida a temperatura nos diferentes pontos do substrato em compostagem a 25°C, o gradiente esperado é inferior ao observado nos ensaios a 40°C, tendo em conta as temperaturas do banho.

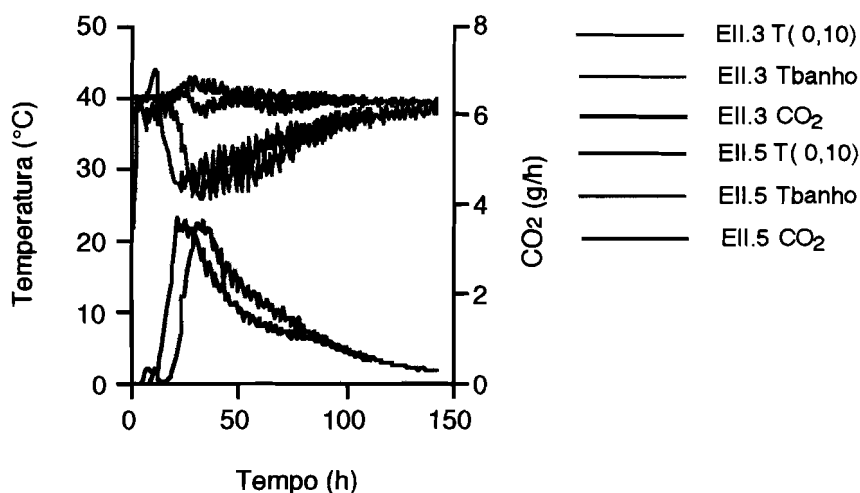


Figura 6.1- Temperatura e evolução da taxa de produção de CO_2 nos ensaios EII.3 e EII.5 (40°C)

Em instalações piloto que pretendem reproduzir, em condições laboratoriais, o fenómeno de autoaquecimento característico do processo de compostagem é

comum a utilização de banhos de água para reduzir as perdas de calor por condução (Strom *et al.*, 1983). Por exemplo, pode citar-se a instalação piloto de compostagem usada por Sikora *et al.* (1983), que ensaiaram diferentes valores entre a temperatura do substrato e da água. No presente trabalho, não se tratava de simular condições de compostagem, conforme Hogan *et al.* (1989) mostraram, mas de estudar a influência da variação inicial da temperatura na taxa de produção de CO₂.

Na situação oposta de se pretender que a compostagem se verifique em condições de temperatura constante, a estratégia de utilização do banho de água visa obter perdas variáveis de calor por condução. Hogan *et al.*, (1989) e Strom *et al.* (1983) referiram que, normalmente, se fixa a temperatura da água, mas daí resulta que a temperatura real de compostagem seja superior à fixada (Strom, 1985b). Por isso, neste trabalho, fixou-se a temperatura do substrato. Relativamente aos gradientes horizontais de temperatura, que normalmente não são caracterizados, Strom *et al.* (1983) sugeriram que, por causa da dimensão do reactor, não se devem verificar afastamentos sensíveis da temperatura fixada. Mas enquanto que Suler e Finstein (1977) e Clark *et al.* (1977) usaram uma quantidade de substrato relativamente reduzida (na ordem de 100g), Campbell e Darbyshire (1990), Nakasaki e Akiyama (1988) e Strom (1985b) usaram, respectivamente, reactores de 26, 28 e 4.5 litros. Campbell e Darbyshire (1990) e Nakasaki e Akiyama (1988) utilizaram a mesma instalação piloto para criar condições de compostagem isotérmicas e adiabáticas, enquanto que Bach *et al.* (1984, 1985), para obterem condições isotérmicas, construíram uma instalação piloto distinta.

6.2.3 Humidade

A humidade do substrato praticamente não varia durante o processo de compostagem, o que indica que as perdas de calor por condução são relativamente importantes (Strom *et al.*, 1993) (Quadro 5.3 e Figura 6.2). De outro modo, a extensão da secagem do material reflecte a importância relativa do arejamento e da condução na remoção do calor (Hogan *et al.*, 1989). Esta evolução é característica de instalações piloto de compostagem, onde o arejamento é usado sobretudo para repôr a concentração de oxigénio ou remover o dióxido de carbono.

O ar de entrada não saturado, remove água do substrato húmido. Este fenómeno é tanto mais intenso quanto maior for a temperatura do substrato em compostagem, conforme diagrama psicrométrico (Wylen e Sonntag, 1985). Contudo, verifica-se

que a tendência para a secagem do material é reduzida, o que resulta do facto da diminuição da matéria orgânica ser mais importante do que a quantidade de água transportada pelo ar de saída, sem que seja considerada a produção biológica de água.

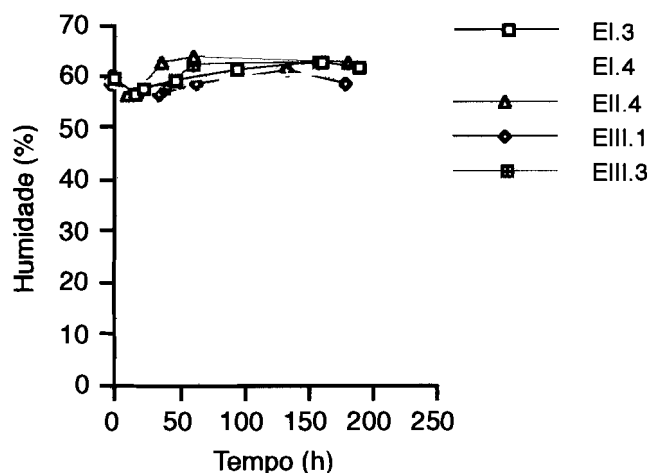


Figura 6.2 Evolução da humidade nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C

Verifica-se que, apesar dos ensaios se terem iniciado com cerca de 60% de humidade (Quadro 5.3), há uma redução inicial que coincide com a acumulação de lixiviado: no ensaio EII.4, após 11 horas, a humidade era 56.9%. A presença de lixiviado, segundo Golueke (1977), indica humidade excessiva.

Notam-se ainda diferenças de humidade entre os vários locais do reactor, que aumentam com o tempo (Quadro 5.4): no ensaio EII.4, que foi o ensaio onde se recolheram amostras mais cedo, a humidade varia entre 54 e 60% às 11 horas e entre 47 e 70%, às 183 horas. Observa-se o desenvolvimento de um gradiente vertical onde o fundo está sempre mais húmido (efeito da gravidade). O topo tem por vezes um comportamento distinto, apresentando teores de humidade superiores à porção “intermédio 1” e “intermédio 2” (ensaio EI.4 e ensaio EII.4 64 horas).

Ao gradiente vertical de humidade acrescenta-se o desenvolvimento de um gradiente horizontal. No início, este gradiente não é significativo quando comparado com o gradiente vertical, mas também se agrava com o tempo. A humidade aumenta do interior para o exterior e as maiores diferenças notam-se no topo ou na porção “intermédio 1”. No fundo, não há gradiente de humidade. Hogan *et al.* (1989) verificaram, por observação macroscópica, que no fim dos ensaios, o composto proveniente do topo e das paredes do reactor estava húmido, o que evidenciava a saturação do ar à saída e a diferença de temperatura entre o substrato e o exterior.

Verifica-se assim que os gradientes de humidades se desenvolvem exactamente de modo inverso dos gradientes de temperatura: esta cresce do fundo para o topo e do exterior para o interior e a humidade cresce do topo para o fundo e do interior para o exterior. E, apesar dos gradientes de temperatura tenderem para se anular com o tempo de ensaio, os gradientes de humidade agravam-se. A caracterização da variação temporal da humidade em ensaios de compostagem é comum (Robinson e Stentiford, 1993), mas não se encontrou uma análise semelhante no espaço. Finstein e Morris (1975) referiram unicamente a possibilidade de distribuição não homogénea da humidade em certas condições de compostagem.

Os valores mínimos e máximos observados nos ensaios EI.4, EII.4 e EII.3 são respectivamente, 46.3 e 73.2%, 46.6 e 73.3% e 29.8 e 78.2%.

Embora a humidade ideal para que a decomposição biológica ocorra sem limitações seja de 100%, verificam-se teores máximos consoante a estrutura do resíduo (Golueke, 1977). O excesso de água interfere com as trocas de oxigénio, conduzindo a condições anaeróbias e a dificuldade na elevação da temperatura (Miller, 1989). Em compostagem, a humidade não deve ser inferior a 45-50% e a actividade cessa para valores da ordem dos 12% (Golueke, 1977). Miller (1989), referiu que uma humidade inicial inferior a 40-50% é insuficiente para o processo arrancar, enquanto que, segundo Stentiford (1996), a maioria dos processos operam entre 40-60%. Haug (1993), interpretou resultados de Schulze, Jeris e Regan e Snell, sobre o efeito da humidade na taxa de consumo de oxigénio de diversos substratos, e concluiu que a actividade é reduzida ou nula abaixo de 20%, aumenta linearmente até um máximo entre 50 e 70%, reduzindo-se para valores superiores.

Uma análise detalhada da variação da humidade (Quadro 5.4), considerando que os valores extremos são pontuais e que a humidade influencia o processo de compostagem, levou ao agrupamento de resultados, assinalados no referido quadro de forma diferenciada. O fundo constitui normalmente um grupo distinto e, só pontualmente, surge um terceiro grupo de valores.

6.2.4 pH

A evolução dos valores de pH nos ensaios realizados é comum na compostagem de resíduos, nomeadamente de resíduos sólidos urbanos (EPA, s.d.; Haug, 1993; Silveira, 1987; Gotaas, 1959): pH inicial ligeiramente ácido, que decresce numa primeira fase, seguida de aumento para valores ligeiramente básicos (Quadro 5.3

e Figura 6.3). Considerou-se, devido ao facto da evolução da taxa de produção de CO_2 ser semelhante nas mesmas condições, uma variação única de pH relativa a cada temperatura ensaiada. A produção de ácidos orgânicos justifica o decréscimo inicial, enquanto que o aumento posterior resulta da produção de azoto amoniacal proveniente da degradação de proteínas (Haug, 1993; Miller, 1992). Em compostagem não se faz a correcção de pH excepto quando o substrato é francamente ácido ou básico, no sentido de reduzir a duração da fase de arranque (Haug, 1993; Nakasaki *et al.*, 1985b; Gotaas, 1959). Nos ensaios a 25°C, o pH final é inferior aos ensaios a 40°C e 25-40°C.

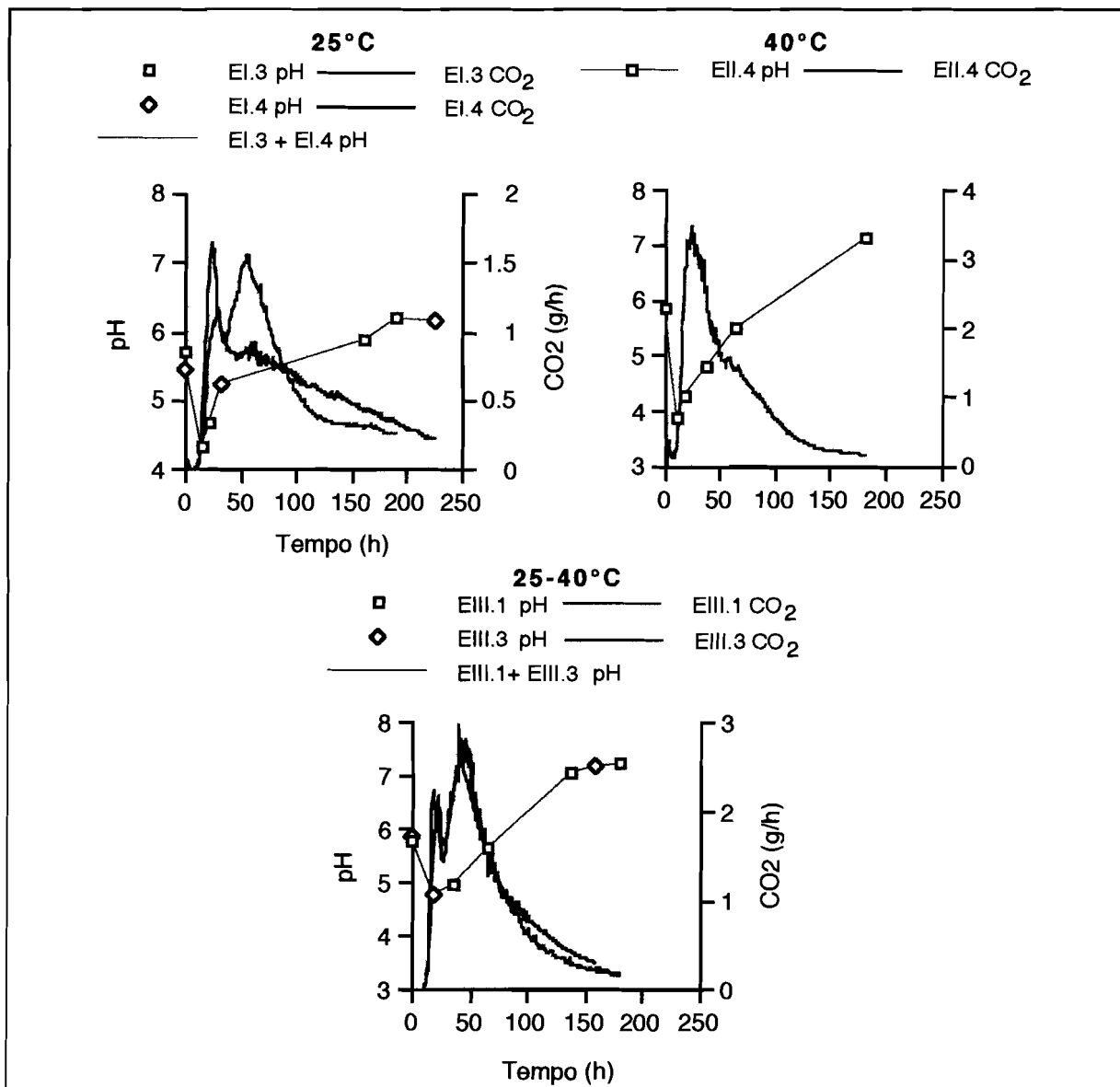


Figura 6.3- Evolução do pH nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C

7. MODELO CINÉTICO DE COMPOSTAGEM

7.1 Objectivos

Os objectivos do presente capítulo compreendem:

- o desenvolvimento do modelo cinético,
- o estudo do seu comportamento, em condições de temperatura fixa (25°C), e a resposta a variações da taxa de produção de CO₂ resultantes da repetição das condições ensaiadas, duração dos ensaios, bem como a variações de temperatura (40 e 25-40°C),
- a selecção da solução, através da análise da qualidade estatística do modelo, e o respectivo confronto com as observações microbiológicas.

7.2 Desenvolvimento do modelo

A observação da variação da taxa de produção de CO₂ em função do tempo, associada à modificação do aspecto exterior dos reactores, levou à formulação da seguinte hipótese: a evolução da taxa de produção de CO₂, com máximos em diferentes momentos, deverá corresponder à modificação das populações microbianas activas durante o processo de compostagem. De outro modo, a taxa de produção de CO₂ é uma medida directa da actividade dos microrganismos e o comportamento geral do gráfico de CO₂ deve poder ser explicado pelo comportamento de populações individuais.

A designação de população nem sempre é usada para referir indivíduos da mesma espécie. Nakasaki e Akiyama (1988) referiram-se à sucessão de populações mesofílica e termofílica; Sopper e Seaker (1987) estudaram a utilização de lamas na recuperação de solos através da variação do número de bactérias, fungos e actinomicetas, referindo-se a cada um destes grupos de microrganismos como populações; Bailey e Ollis (1986) referiram que, em cada momento, um substrato era colonizado por uma população activa, constituída por diversas espécies e a acção de factores diversos era responsável pela substituição por outra população; Strom (1985b) discutiu a temperatura em compostagem de acordo com um critério de diversidade de espécies, desejável para a estabilidade da população e a versatilidade metabólica. No texto que se segue e associado ao modelo que se propõe, o termo população é usado para referir o conjunto dos microrganismos que ocorrem num dado momento e que podem pertencer a grupos tão diferentes como bactérias e fungos.

As populações foram designadas por P_I , P_{II} , P_{III} ou P_{IV} , consoante o momento relativo do seu aparecimento, distinguindo-se a população P_I pela ausência de bolores.

A evolução da produção acumulada de CO_2 em sistemas descontínuos de compostagem apresenta um comportamento sigmoideal e a evolução da taxa de produção de CO_2 corresponde à sua forma diferencial.

Na realidade, a curva de crescimento dos microrganismos, quando expressa pelo número ou pelo logaritmo do número de microrganismos em função do tempo, resulta numa curva sigmoide, onde é possível distinguir as fases de latência, aceleração, exponencial, retardação e estacionária, a que se acrescenta a fase endógena ou morte (Monod 1949, citado por Benefield e Randall, 1980; Bailey e Ollis, 1986). Diversos modelos matemáticos têm sido propostos para descrever esta curva, mas são raros os trabalhos que justificam a respectiva escolha.

Zwietering *et al.* (1990), utilizando um algoritmo de Marquardt, fizeram um estudo comparativo do crescimento de bactérias em solução pela aplicação dos seguintes modelos: logístico, de Gompertz, de Richards, de Schnute e de Stannard. Os modelos logístico e de Gompertz permitem aceder aos parâmetros que caracterizam a curva de crescimento: duração da fase de latência, taxa específica máxima de crescimento e número máximo de microrganismos, enquanto que os modelos de Richards, de Schnute e de Stannard, necessitam de um quarto parâmetro que não tem significado biológico e diz respeito à forma.

Zwietering *et al.* (1990) verificaram que o modelo de Gompertz foi estatisticamente aceite em 70% dos casos examinados, enquanto que o modelo logístico variou entre 52% e 59%, consoante o teste estatístico utilizado. Relativamente aos modelos de quatro parâmetros, chegaram à conclusão de que são basicamente o mesmo formalismo mas, segundo os referidos autores, sempre que modelos de três parâmetros descrevam suficientemente os dados experimentais, devem ser preferidos relativamente aos de quatro parâmetros, dado que são mais simples de usar, a solução é mais estável (parâmetros menos correlacionados) e que é possível atribuir a todos os parâmetros um significado biológico.

Acresce que o modelo de Gompertz é, segundo Gibson *et al.* (1987), mais adequado para descrever a curva sigmoide de crescimento dos microrganismos do que o modelo logístico, embora este seja mais usado. A curva logística, ao contrário da de Gompertz, é simétrica em relação ao momento em que a taxa de crescimento é máxima e, embora muitas curvas de crescimento de microrganismos

sejam, ainda segundo os mesmos autores, "obviamente assimétricas", a curva logística é mais facilmente determinada com uma quantidade reduzida de observações, aliás a situação que ocorre no caso de contagens manuais.

Os trabalhos de Zwietering *et al.* (1990) e Gibson *et al.* (1987) justificaram a utilização do formalismo de Gompertz como base do modelo desenvolvido. Na forma integral, o modelo pode ser representado pela equação:

$$Y = A \exp[-\exp(B - C * t)] \quad (1)$$

e na forma diferencial,

$$\frac{\partial}{\partial t} Y = A * C * \exp[-\exp(B - C * t)] * \exp(B - C * t) \quad (2)$$

onde Y é a concentração de microorganismos, A, B e C são parâmetros e t a variável tempo.

Zwietering *et al.* (1990) procederam à transformação dos parâmetros A, B e C, para lhes associar um significado biológico, facilitando assim a atribuição de valores iniciais, do seguinte modo:

$$A = \ln(Y / Y_0) \quad (3)$$

$$B = \mu_{\text{máx}} * \exp(1) * \lambda / A + 1 \quad (4)$$

$$C = \mu_{\text{máx}} * \exp(1) / A \quad (5)$$

Y e Y₀ são respectivamente, o tamanho máximo e o tamanho inicial da população de microrganismos, expressos em número ou biomassa, λ a duração da fase de latência, definida pela intersecção no eixo dos xx da tangente no ponto de inflecção e expressa em unidades de tempo (T), e μ_{máx}, a taxa específica máxima de crescimento, definida como a tangente no ponto de inflecção e expressa em T⁻¹. Como Y₀ é muito reduzido quando comparado com Y, A é igual a Y.

O modelo desenvolvido nesta dissertação considera que a actividade observada durante o processo de compostagem é explicada pelo somatório do comportamento de populações individuais (i=1 a n), cada uma com um crescimento descrito pelo modelo de Gompertz e sendo caracterizada pelos parâmetros A_i, λ_i, e μ_{máx,i}. Acresce que Wiegant (1992) verificou que o crescimento do bolor *Scytalidium thermophilum*, medido pela produção de biomassa, estava

relacionado, através de um coeficiente de conversão, com a produção de CO₂. Deste modo, o modelo na forma genérica, tem assim a seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} Y = \sum_{i=1}^n A_i * (K_{\text{máx},i} * \exp(1) / A_i) * \exp((K_{\text{máx},i} * \exp(1) * L_i / A_i + 1) - (K_{\text{máx},i} * \exp(1) / A_i) * t - \exp((K_{\text{máx},i} * \exp(1) * L_i / A_i + 1) - (K_{\text{máx},i} * \exp(1) / A_i) * t)) \quad (6)$$

"A_i" representa a produção máxima de CO₂ (expressa em gramas), K_{máx,i} é a taxa máxima de produção de CO₂ (gh⁻¹) e L_i é a duração da fase de latência (h⁻¹).

7.2.1 Estimação dos parâmetros

O modelo proposto nesta dissertação é um modelo não linear podendo, de uma forma geral, ser representado da seguinte forma (Bates e Watts, 1988, p.32):

$$Y = f(\theta, t) + \epsilon \quad (7)$$

sendo Y a variável dependente (a taxa de produção de CO₂), f a função não linear da variável independente t (tempo) e do vector de parâmetros θ (A_i, L_i e K_{máx,i}), e ϵ a componente estocástica do modelo, o erro. A função não linear da variável independente t e do vector de parâmetros θ corresponde a um somatório de funções, que varia com o número de populações considerado.

O vector de parâmetros θ foi estimado através do método dos mínimos quadrados, tendo-se utilizado os algoritmos Quasi-Newton (Microsoft Excel, 1992) e Levenberg-Marquardt (SPSS, 1993). O método minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre os valores de Y estimados pelo modelo e os valores de Y observados. A diferença entre o valor de Y estimado e o valor de Y observado é designada por resíduo, que na prática, é a forma de estimar o erro. As estimativas dos parâmetros a que corresponde a menor soma dos quadrados dos resíduos (designada por função de perda) é a solução ótima. O processo é iterativo e considerou-se atingida a convergência quando a diferença entre estimativas sucessivas era inferior a 1x10⁻⁸. Para procurar a solução estimam-se os valores iniciais para os vários parâmetros que caracterizam cada população (A_i, L_i e K_{máx,i}). O facto da função não linear ser um somatório de funções dificulta o processo de convergência.

Segundo Bates e Watts (1988, p.24), a estimação do vector θ de parâmetros associados ao modelo não linear através do método dos mínimos quadrados, pressupõe nomeadamente que a especificação do modelo é a correcta, os erros associados com quaisquer duas observações são independentes e a distribuição de probabilidades de ε é normal, com média zero e variância constante. O não cumprimento dos pressupostos, nomeadamente no que respeita ao comportamento do erro, indica a necessidade de alterações, que podem ser de modificação da componente determinística ou estocástica do modelo e leva a que o procedimento de verificação dos pressupostos deva ser repetido.

7.2.2 Avaliação da qualidade do modelo

Depois de estimados os parâmetros através do método dos mínimos quadrados, procedeu-se, conforme é sugerido por Bates e Watts (1988, p.91), à análise gráfica do ajustamento entre os valor de CO₂ observados e estimados. Posteriormente, foram efectuadas diferentes análises com o auxílio do programa estatístico SPSS (1993), no sentido da avaliação da qualidade do modelo.

7.2.2.1 Estatísticas de ajustamento

Para obter uma medida global do ajustamento, estimou-se o coeficiente de determinação, r^2 , que representa a percentagem de variação de Y que é explicada pelo modelo (Mendenhall e Sincich, 1992, p.494). Mas como o valor de r^2 depende do número de observações e de parâmetros, só pode ser utilizado como uma medida do ajustamento *per se*.

Admitindo que os pressupostos associados à componente erro se cumprem, construíram-se ainda, utilizando a estimativa do desvio padrão do erro e a estatística t -Student, intervalos de confiança assintóticos para os parâmetros. Deste modo, pretendeu-se determinar em que medida cada parâmetro contribuía com informação para o modelo (Mendenhall e Sincich, 1992, p.486).

7.2.2.2 Análise do resíduo

Para avaliar o pressuposto dos erros associados com quaisquer duas observações serem independentes e portanto da aleatoriedade da sua distribuição (Mendenhall e Sincich, 1992, p.513), representou-se o resíduo em função da variável

independente, o tempo. Representou-se, também, o resíduo em função da variável dependente, a taxa de produção de CO₂ estimada pelo modelo, para avaliar o pressuposto de variância constante ou homogênea (Mendenhall e Sincich, 1992, p.514). Utilizaram-se histogramas para avaliar a normalidade da distribuição do erro e calculou-se o seu valor médio. A normalidade da distribuição do erro foi avaliada através de critérios de forma e simetria (Mendenhall e Sincich, 1992, p.519).

7.2.2.3 Comparação de soluções

Na tentativa de melhorar o ajustamento entre os valores de CO₂ observados e estimados pelo modelo, experimentou-se variar o número de populações no mesmo ensaio e estudou-se o comportamento do resíduo. Deste modo, o número de parâmetros e os graus de liberdade associados ao modelo também variam, tendo-se por isso recorrido a um teste específico, o teste da razão de verossimilhança, para a comparação das soluções. A estatística do teste é calculada através da expressão (Brown e Rothery, 1993, p.589):

$$F^* = \frac{(SQR_1 - SQR_2) / (GLR_1 - GLR_2)}{SQR_2 / GLR_2} \quad (8)$$

onde os índices 1 e 2 referem, respectivamente, o modelo com menos e o modelo com mais parâmetros, SQR é a soma dos quadrados do resíduo e GLR os graus de liberdade associados ao resíduo.

Sob a hipótese dos modelos serem equivalentes, a razão (8) distribui-se segundo uma variável *F*-Snedecor com GLR₁-GLR₂ e GLR₂ graus de liberdade.

7.2.2.4 Avaliação biológica

Os resultados da análise estatística foram confrontados com a alteração do aspecto macroscópico dos reactores e a modificação dos bolores activos no processo de compostagem, o que permitiu detectar inconsistências e sugerir correcções.

7.2.3 Pressupostos do modelo

Assumiram-se os seguintes pressupostos para o modelo cinético de compostagem:

- o modelo de Gompertz descreve o crescimento dos microrganismos
- cada população é constituída pelo conjunto dos microrganismos que ocorrem num dado momento e a variação dos microrganismos na população significa o aparecimento de outra população
- a modificação das populações baseada no comportamento dos bolores, admite que os outros grupos de microrganismos evoluíram do mesmo modo

7.3 Modelação

7.3.1 Número de microrganismos

A sobreposição dos resultados das contagens de bactérias e bolores (expressos em unidades formadoras de colónias) com a evolução da taxa de produção de CO₂ durante os ensaios de compostagem, respectivamente, Quadro 5.8 e Figuras 5.6 e 5.7, mostra que, apesar do número de microrganismos na fase final se manter elevado, a taxa de produção de CO₂ é reduzida (Figura 7.1). Verifica-se assim que, embora a cultura em placas forneça informação sobre as células potencialmente viáveis, não permitem distinguir os microrganismos activos no processo de degradação. Acresce ainda que, os resultados de crescimento em placa são pontuais, enquanto que a produção de CO₂ pode ser determinada em contínuo. Deste modo, o desenvolvimento do modelo cinético de compostagem através da taxa de produção de CO₂, complementada com informação dos microrganismos activos, parece ser uma abordagem correcta. A evolução do número de microrganismos é semelhante e da mesma ordem de grandeza da obtida por Nakasaki *et al.* (1985a,b) em ensaios de compostagem e utilizada por estes autores nos estudos de sucessão de microrganismos.

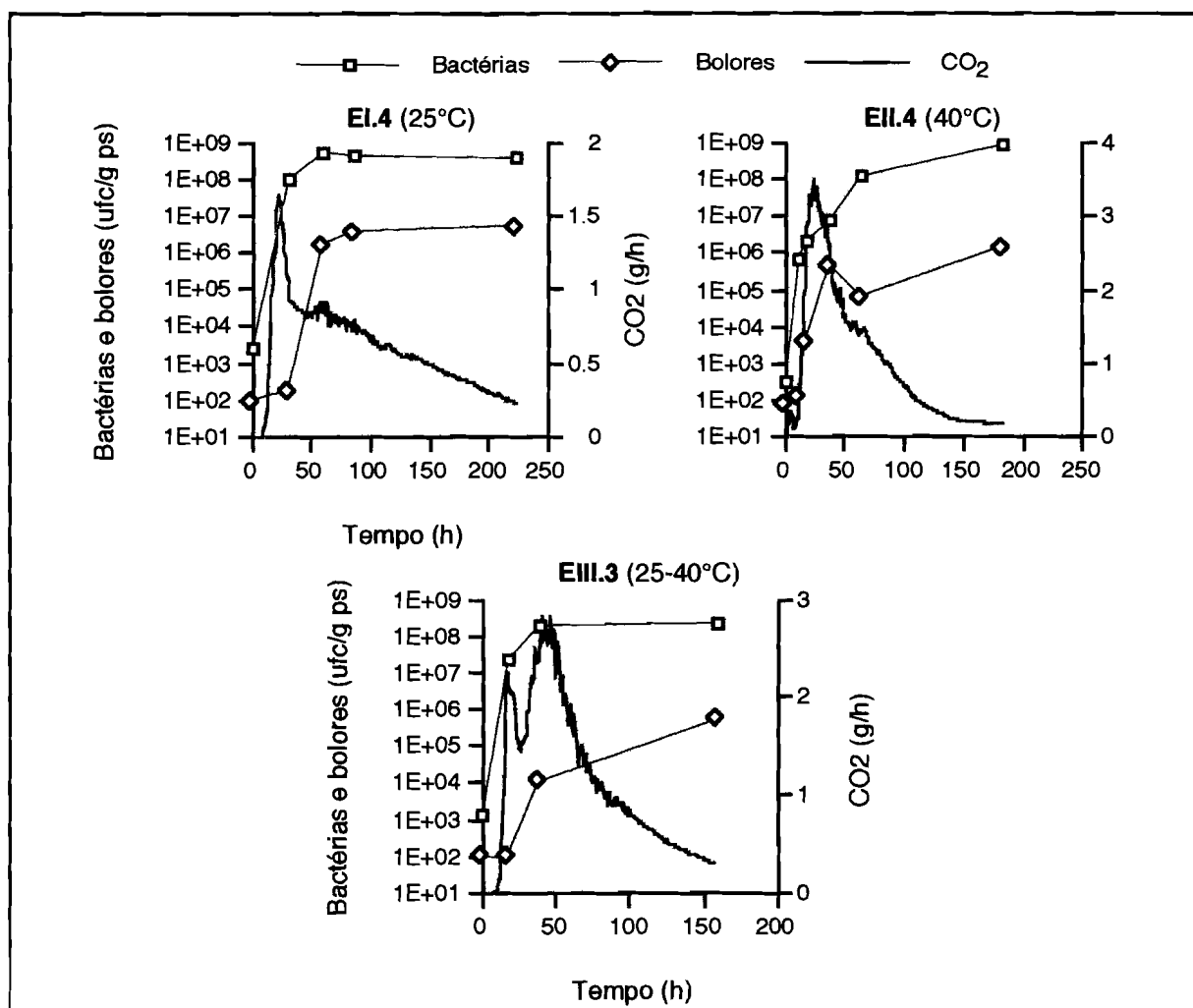


Figura 7.1- Número de microrganismos e evolução da taxa de produção de CO₂ nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C

7.3.2 Número de populações

O número de populações de microrganismos necessário para explicar a evolução da taxa de produção de CO_2 foi determinado através da aplicação do modelo cinético de compostagem, considerando um número crescente de populações. Os ensaios EI.1 (213h) e EI.2 (180h) foram usados para este efeito, tendo-se procedido ao ajustamento do modelo que considera uma, duas, três e quatro populações (Figuras 7.2 e 7.3). Verifica-se que quanto maior é o número de populações, melhor é o ajustamento; contudo, no caso de três e quatro populações, a escolha da melhor solução pela observação directa não é evidente.

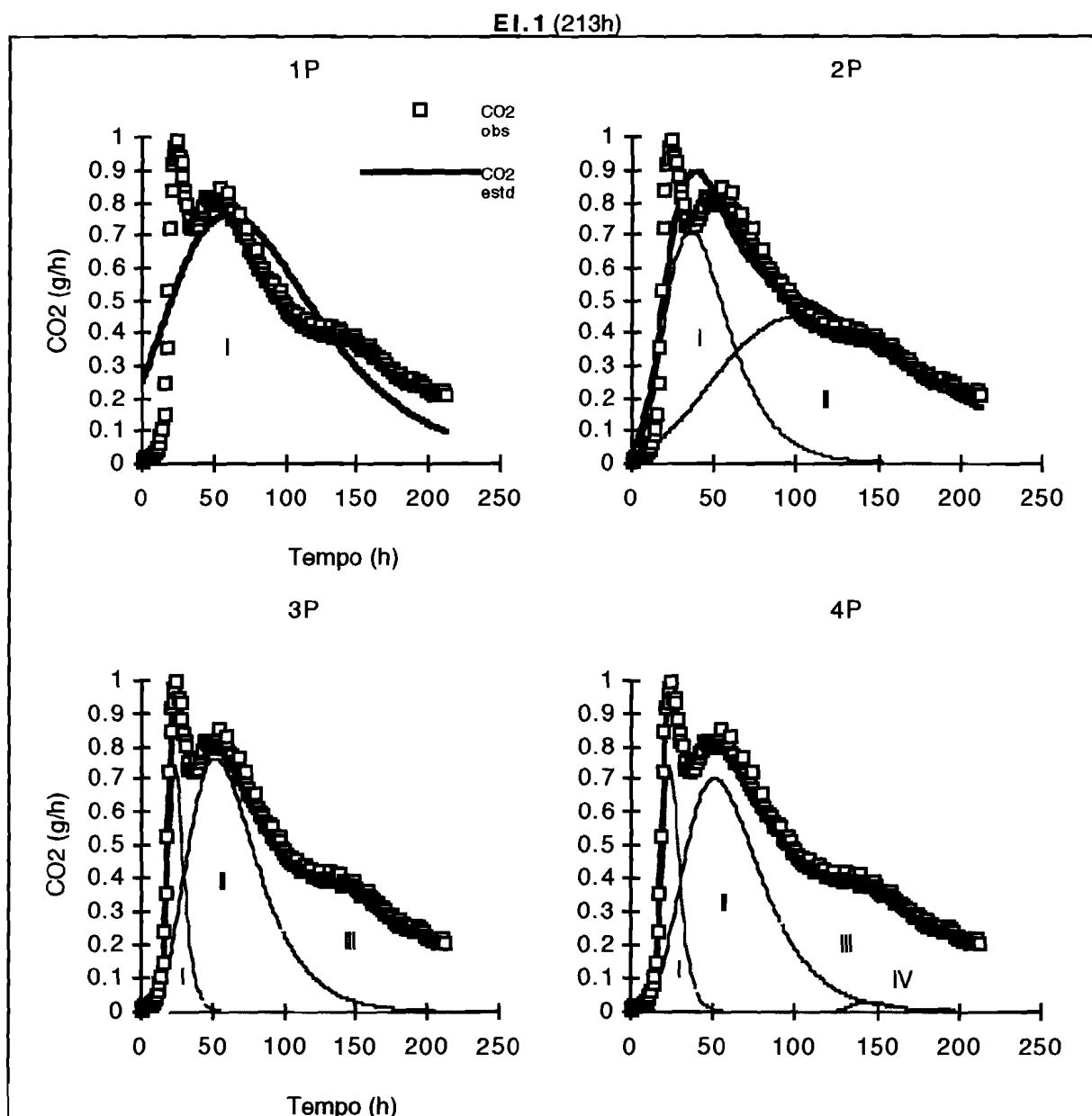


Figura 7.2- Modelo cinético de compostagem- número de populações (EI.1- 213h)

EI.2 (180h)

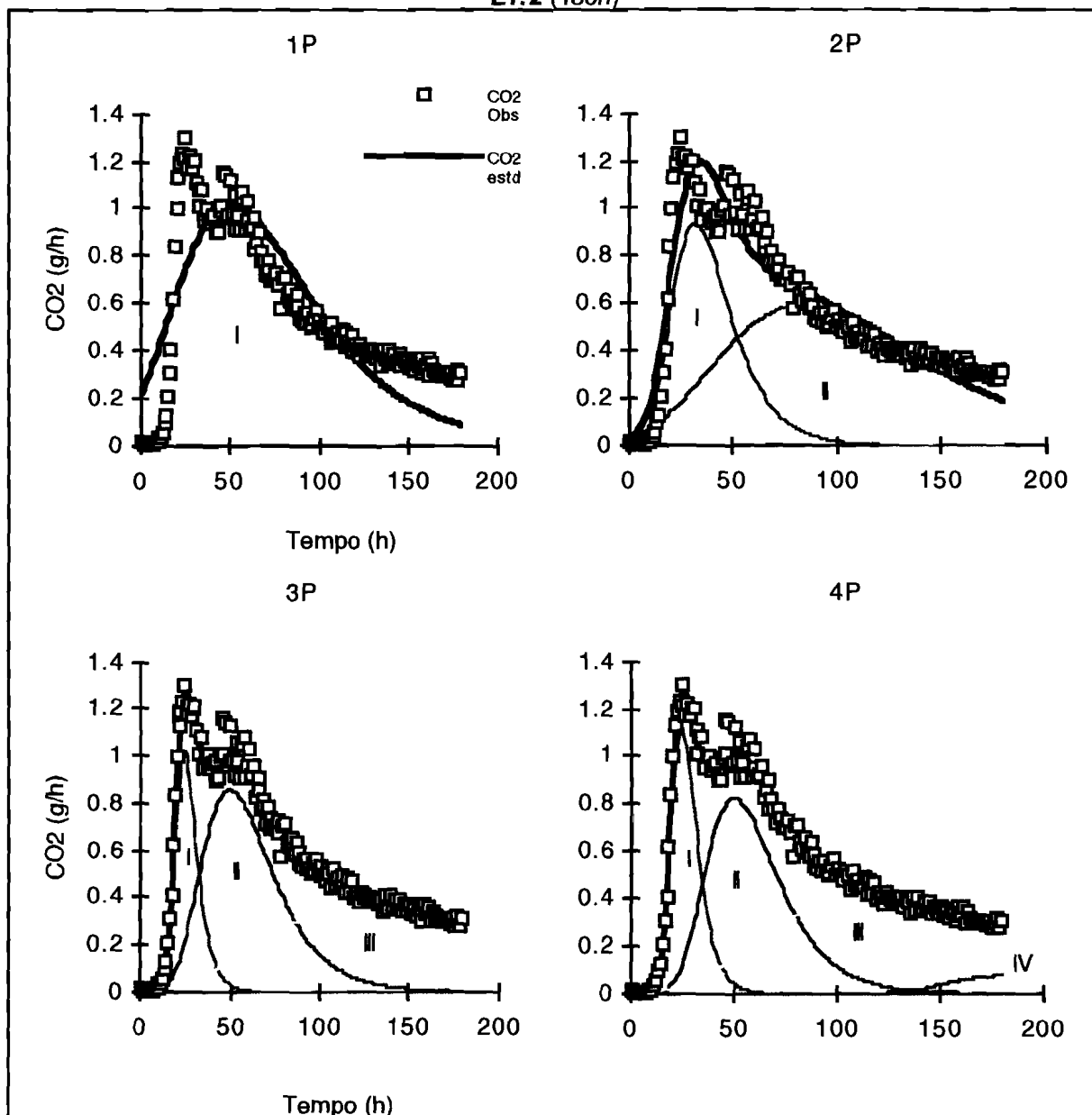


Figura 7.3- Modelo cinético de compostagem- número de populações (EI.2- 180h)

Constata-se que o modelo se comporta de forma diferente quando se considera a quarta população: no ensaio EI.1 (213h), apesar de ter uma duração ligeiramente superior, a população IV desenvolve-se em simultâneo com a população III, enquanto que no ensaio EI.2 (180h), a população IV começa a crescer ainda na presença da população III, mas o seu crescimento prolonga-se para além da sua presença (Figura A.I.1) Constata-se ainda que, no ensaio EI.1 (213h), a população II começa a crescer antes da população I e a consideração de quatro populações não melhora a situação, pelo contrário, piora no caso da população III. No ensaio EI.2 (180h), as populações II e III crescem depois da população I e o crescimento da população II é atrasado quando se consideram quatro populações (Figura A.I.2).

O ajustamento do modelo que considera três e quatro populações nos dois ensaios é superior (r^2 maior ou igual a 0.99) quando comparado com a situação de uma ou duas populações (Quadro 7.1 e Quadros A.I.1 a A.I.8).

Quadro 7.1- r^2 - ensaios EI.1 (213h) e EI.2 (180h)

	n° de populações			
	1 P	2 P	3 P	4 P
EI.1 (213h)	0.652	0.875	0.997	0.998
EI.2 (180h)	0.659	0.885	0.986	0.986

A análise do comportamento dos resíduos mostra que o aumento do número de populações reduz o resíduo (Figuras 7.4 e 7.5).

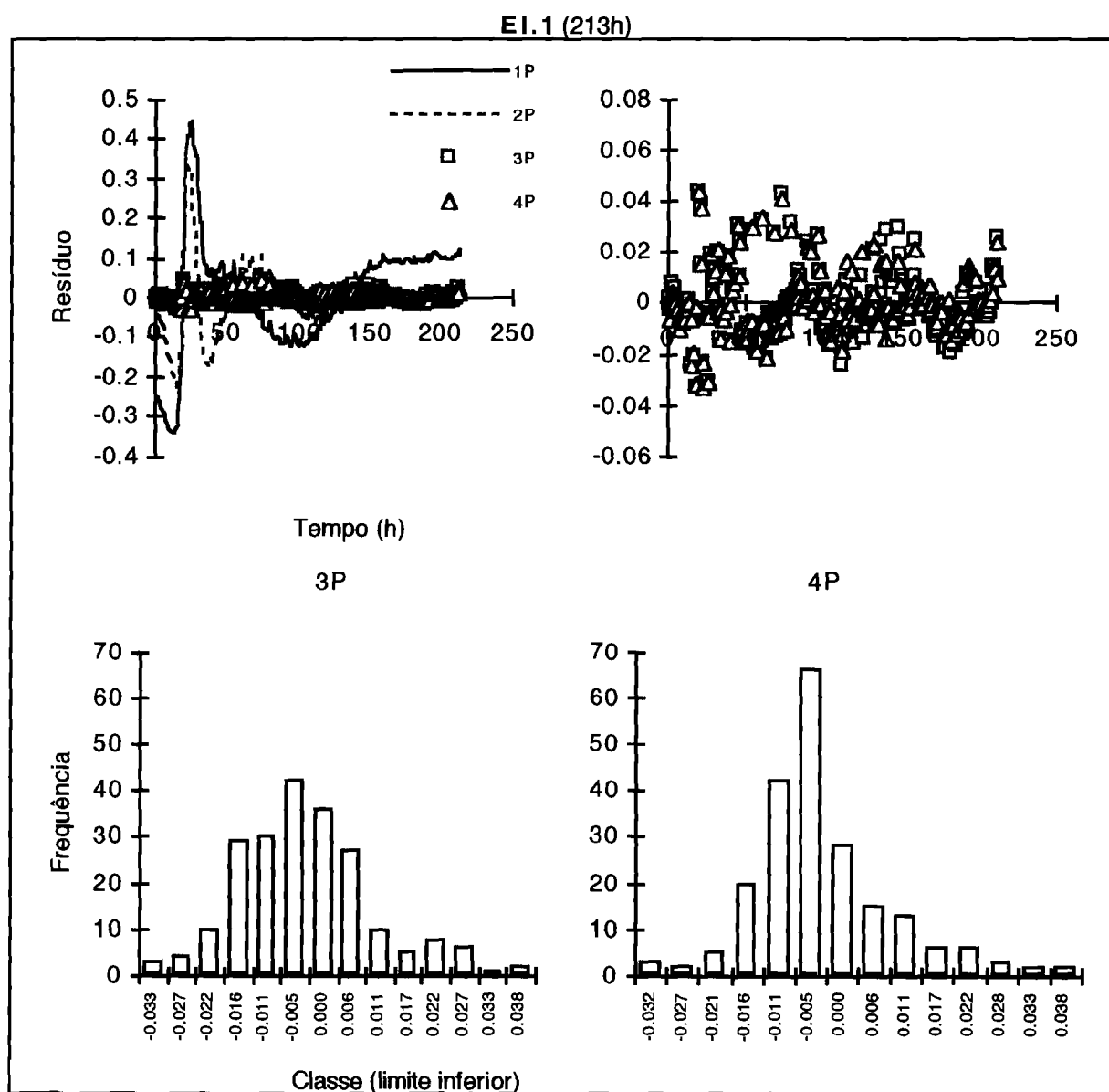


Figura 7.4- Análise de resíduos (EI.1- 213h)

Efectivamente este comportamento verifica-se quando se passa de uma para duas populações e de duas para três, mas a consideração de três ou quatro populações parece ser indiferente. No ensaio EI.1 (213h), com três e quatro populações, nota-se uma tendência para a distribuição do resíduo em torno do eixo do xx, o tempo, assumindo valores alternadamente positivos e negativos, sobretudo após cerca de 100 horas, mas no ensaio EI.2 (180h) essa distribuição pode ser considerada aleatória. A distribuição de frequências do resíduo nos dois ensaios não se afasta de uma distribuição Normal, nem o valor médio de zero, tanto com três como com quatro populações (Figuras 7.4, 7.5 e 7.6). Relativamente à variância do resíduo, no ensaio EI.2 (180h), esta aumenta com o valor de CO_2 estimado tanto com três como com quatro populações e no ensaio EI.1 (213h) verifica-se a distribuição não aleatória do resíduo já referida anteriormente (Figura A.II.1).

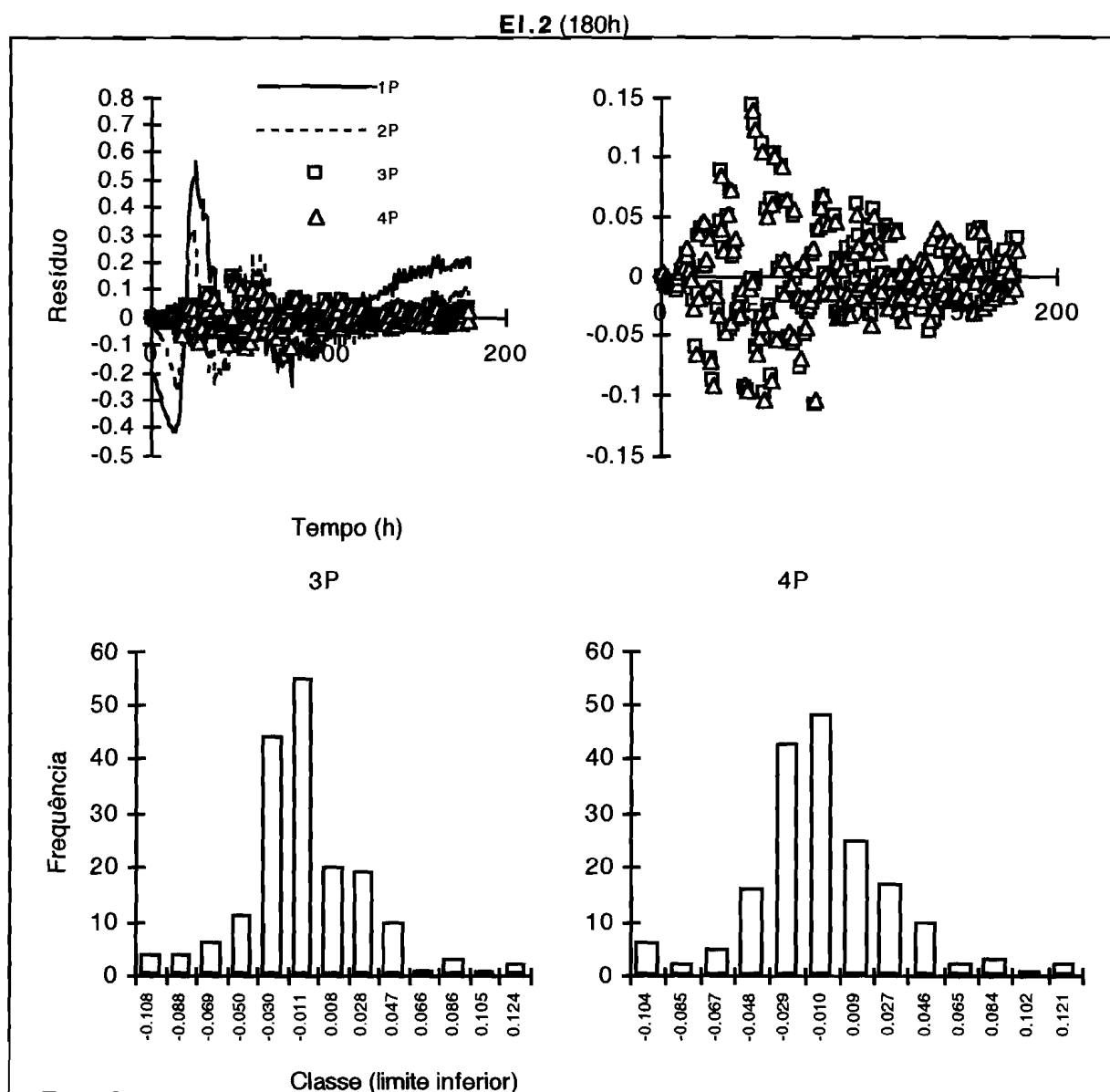


Figura 7.5- Análise de resíduos (EI.2- 180h)

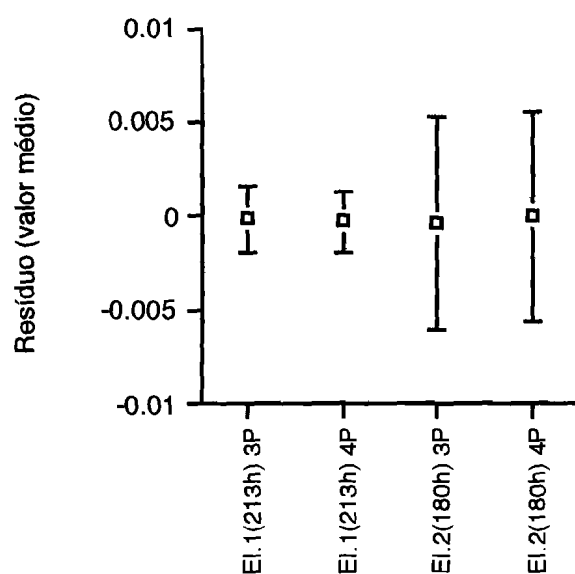


Figura 7.6- Valor médio dos resíduos (El.1- 213h e El.2- 180h)

A influência do número de populações na estimativa dos parâmetros que as caracterizam pode ser analisada através das Figuras 7.7 e 7.8 e Quadros A.1.1 a A.1.8.

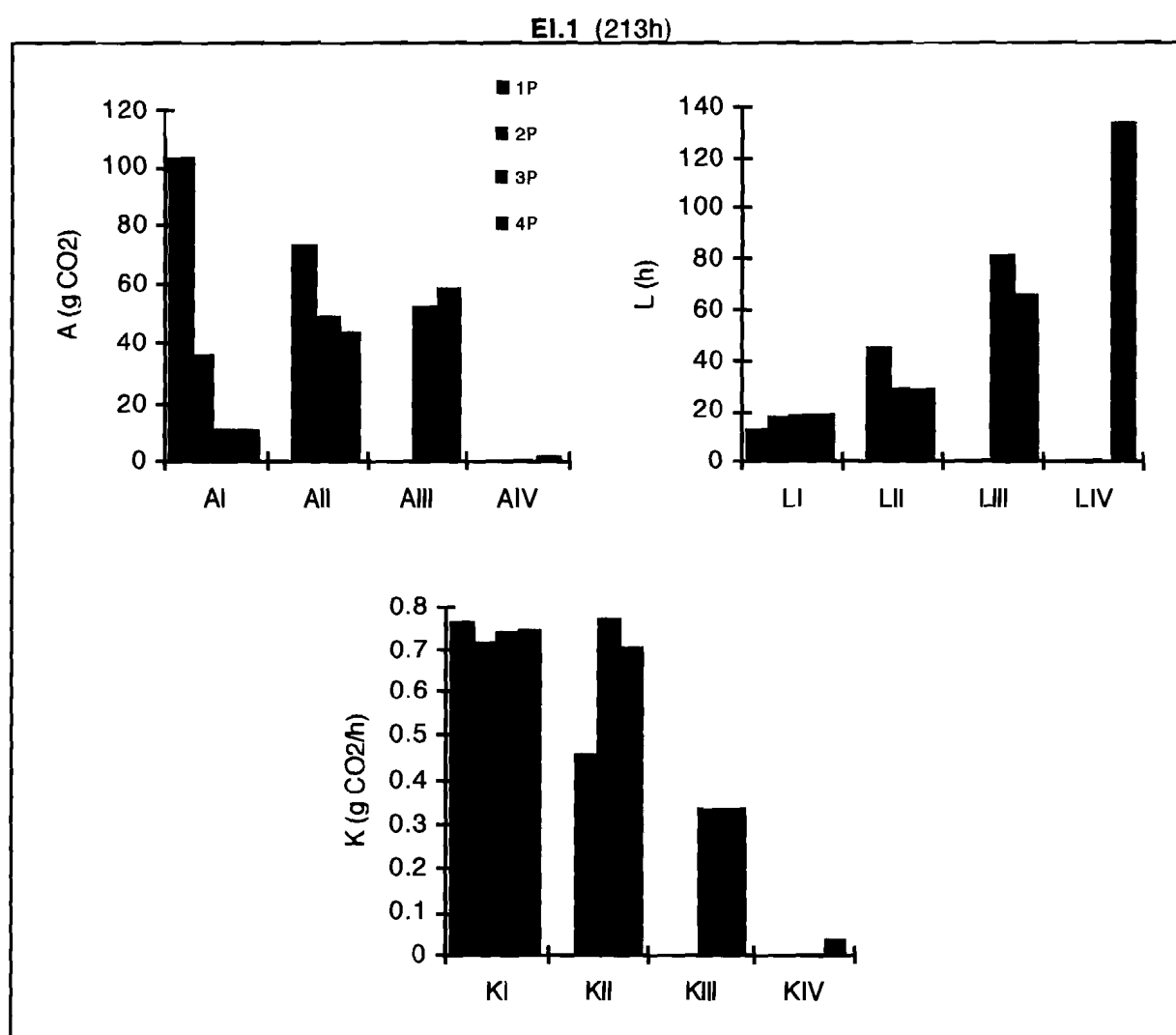


Figura 7.7- Estimativas dos parâmetros (El.1- 213h)

A população I, sobretudo a estimativa de "A", depende do facto de se considerar uma, duas ou três populações, mas é indiferente serem três ou quatro (ensaios EI.1- 213h e EI.2- 180h). A população II praticamente estabiliza quando se consideram três ou quatro populações. A população III varia ligeiramente com a quarta população, mas estes dados não são suficientes para saber se atingiu a estabilidade. Estes dados também não permitem o mesmo raciocínio para a população IV (§7.3.3 "Duração dos ensaios"). Conclui-se pois que o facto de se considerarem quatro populações não interfere de modo relevante nas características quantitativas das populações I e II, que estabilizam quando se considera a população III e que os dados não são suficientes para tirar conclusões sobre as populações III e IV.

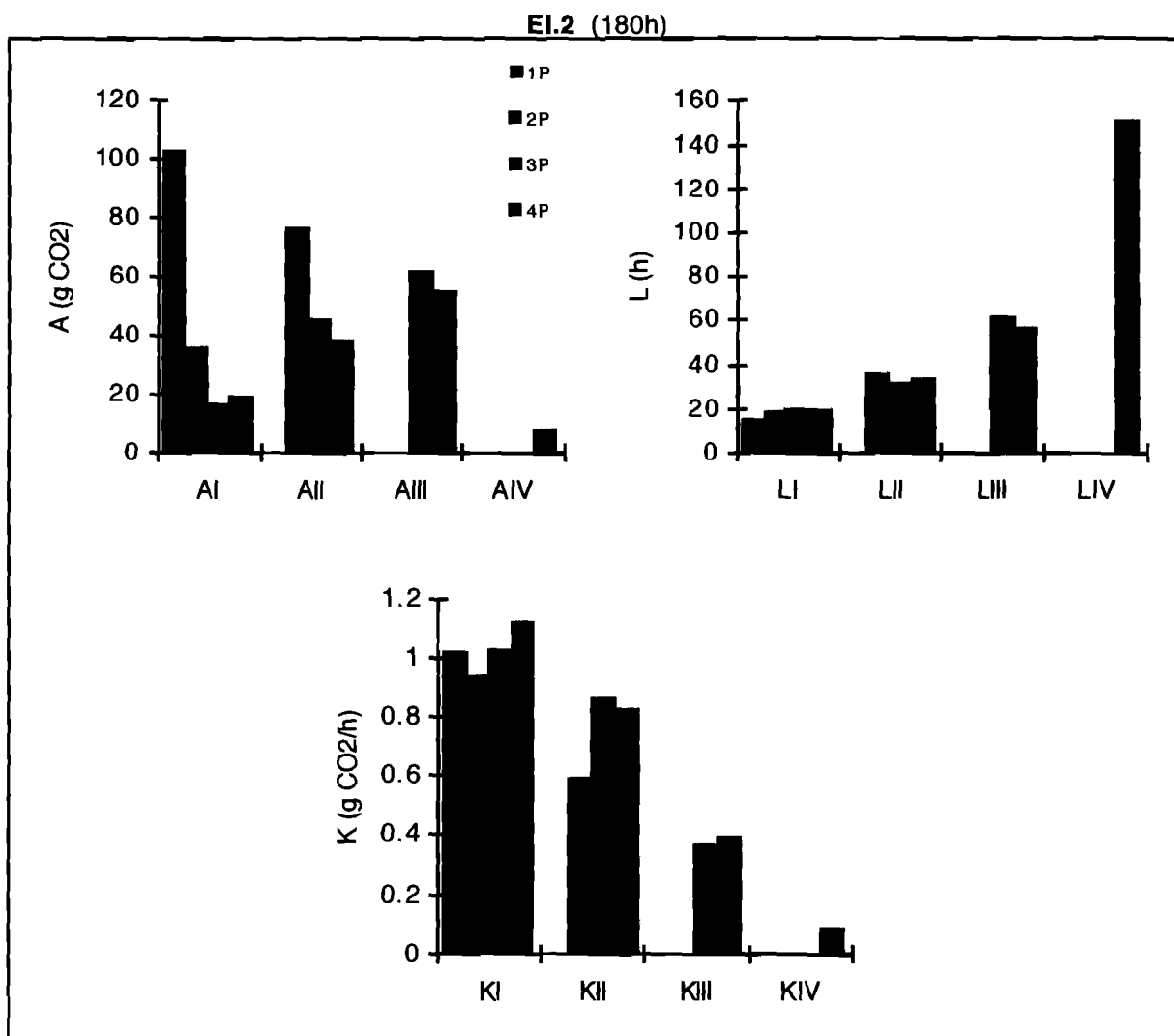


Figura 7.8- Estimativas dos parâmetros (EI.2- 180h)

A análise dos intervalos de confiança assintóticos dos parâmetros a 95%, chama a atenção para o ensaio EI.2 (180h) quatro populações, onde A_{IV} e K_{IV} podem

assumir valores iguais ou inferiores a zero, o que significa que esta população pode não existir (Quadros A.I.1 a A.I.8).

O teste da razão de verossimilhança indica que, para um nível de significância de 0.05, a solução com quatro populações é a melhor no caso do ensaio El.1 (213h) e a com três populações no ensaio El.2 (180h) (Quadro 7.2). Neste último caso, o valor estimado para a estatística do teste é próximo do valor crítico (2.60) não se rejeitando definitivamente a solução com quatro populações.

Quadro 7.2- Valor da estatística do teste da razão de verossimilhança- ensaios El.1 (213h) e El.2 (180h) (+)

	Solução		
	1 P - 2 P	2 P - 3 P	3 P - 4 P
El.1 (213h)	123.2	2675.7	14.9
El.2 (180h)	114.5	408.2	1.32

(+) Valor crítico $F_{3,\infty,0.05}=2.60$

Apesar do resultado do teste da razão de verossimilhança, o facto de no ensaio El.1 (213h) a quarta população se desenvolver totalmente em simultâneo com a população III, fez com que esta solução fosse preterida relativamente à situação de três populações. No ensaio El.2 (180h), a forma como cresce a população IV justifica a escolha desta solução, muita embora se admita que, tendo em conta o resultado do teste da razão de verossimilhança e os intervalos de confiança de A_{IV} e K_{IV} , esta população possa não se desenvolver.

7.3.3 Duração dos ensaios

Para estudar a influência da duração dos ensaios na evolução da taxa de produção de CO_2 e no número de populações, os ensaios EI.1 e EI.2 foram prolongados até 450 horas (Figuras 7.9 e 7.10).

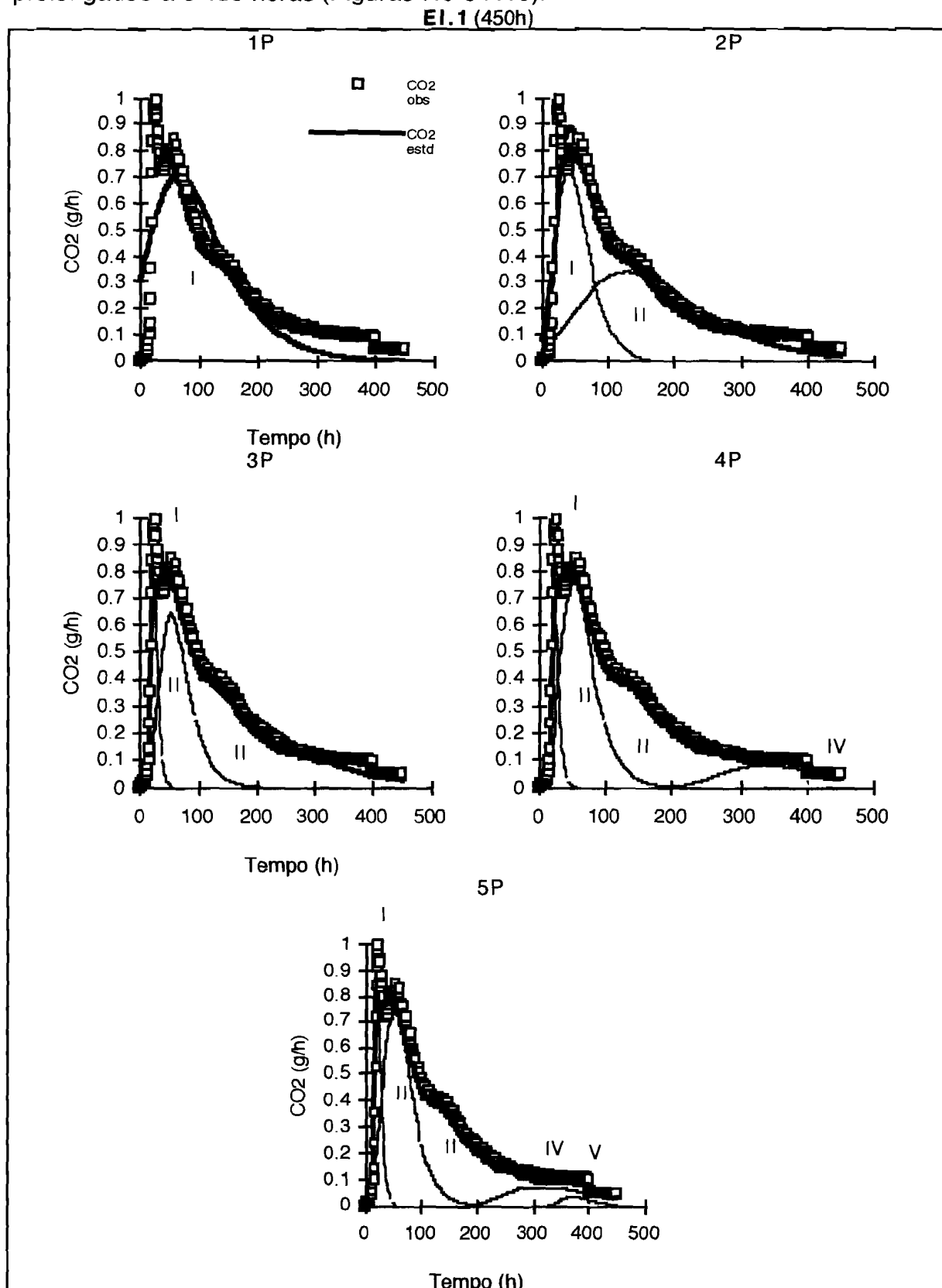


Figura 7.9- Modelo cinético de compostagem- número de populações (EI.1- 450h)

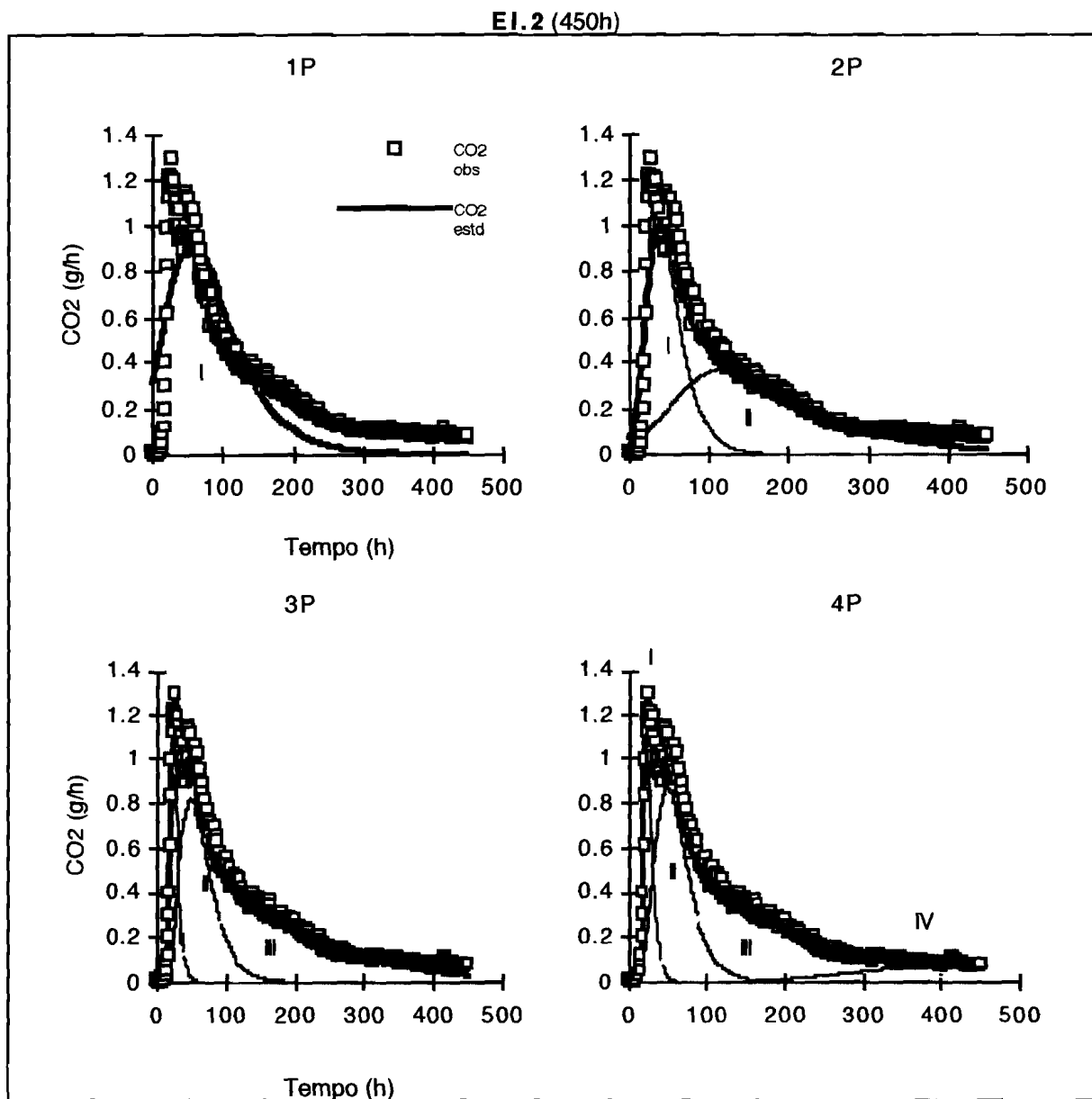


Figura 7.10- Modelo cinético de compostagem- número de populações (EI.2- 450h)

Para comparar as soluções para o mesmo ensaio tendo-se considerado durações diferentes, procedeu-se de acordo com a metodologia do §7.3.2 "Número de populações", determinando a melhor solução para 450 horas e comparando esta solução com a melhor solução obtida no mesmo ensaio com menor duração. Deste modo, experimentou-se o ajuste do modelo que considera uma, duas, três, quatro e cinco populações aos ensaios EI.1 (450h) e EI.2 (450 h).

No ensaio EI.1 (450h) foi possível ajustar a quinta população, embora esta se desenvolva simultaneamente com a quarta população, enquanto que no ensaio EI.2 (450h), ao proceder ao ajustamento da quinta população, não se obteve convergência com qualquer dos algoritmos seleccionados e diferentes conjuntos

de dados iniciais. Enquanto que nos ensaios EI.1 (450h) e EI.2 (450h) a consideração da quarta população melhora o ajustamento inicial e final entre o CO₂ observado e o CO₂ estimado, no ensaio EI.1 (450h) a necessidade da quinta população já não é evidente (Figuras A.I.1 e A.I.2). Nestes ensaios, a quarta população é colocada na fase final e no ensaio EI.1 (450h) a quinta população tem o mesmo comportamento que a quarta população no ensaio EI.1 (213h) (Figura 7.2). No ensaio EI.2 (450h), a quarta população é aparentemente a mesma do ensaio até às 180 horas, numa fase mais desenvolvida (Figura 7.3). No ensaio EI.1 (450h), independentemente de serem quatro ou cinco populações, a população II cresce antes da população I, enquanto que no ensaio EI.2 (450h) quatro populações, as populações II e III começam a crescer, apesar de mais lentamente, praticamente ao mesmo tempo que a população I (Figura A.I.2).

O valor de r^2 é igual ou maior que 0.99 quando se consideram três ou quatro populações nos ensaios EI.1 (450h) e EI.2 (450h) e também a quinta população no ensaio EI.1 (Quadro 7.3 e Quadros A.I.9 a A.I.17).

Quadro 7.3- r^2 - ensaios EI.1 (450h) e EI.2 (450h)

	nº de populações				
	1 P	2 P	3 P	4 P	5 P
EI.1 (450h)	0.778	0.923	0.987	0.998	0.998
EI.2 (450h)	0.747	0.927	0.985	0.993	-

No ensaio EI.1 (450h) a consideração de quatro ou cinco populações reduz substancialmente o resíduo, mas nota-se contudo a existência de uma distribuição em torno do eixo dos xx, o tempo, sobretudo após cerca de 100 horas (Figura 7.11). A distribuição de frequências do resíduo é aproximadamente Normal, bem como o valor médio de zero, com quatro e cinco populações (Figuras 7.11 e 7.13). No que diz respeito à variância, a análise da Figura A.II.1 evidencia a distribuição não aleatória do resíduo, referida anteriormente. No ensaio EI.2 (450h), o resíduo reduz-se com quatro populações e na fase inicial a sua distribuição é aleatória (Figura 7.12). A distribuição de frequências do resíduo e o seu valor médio aproximam-se respectivamente de uma distribuição Normal e de zero quando se considera a quarta população (Figuras 7.12 e 7.13). A variância do resíduo aumenta com o valor de CO₂ estimado com quatro populações (Figura A.II.1).

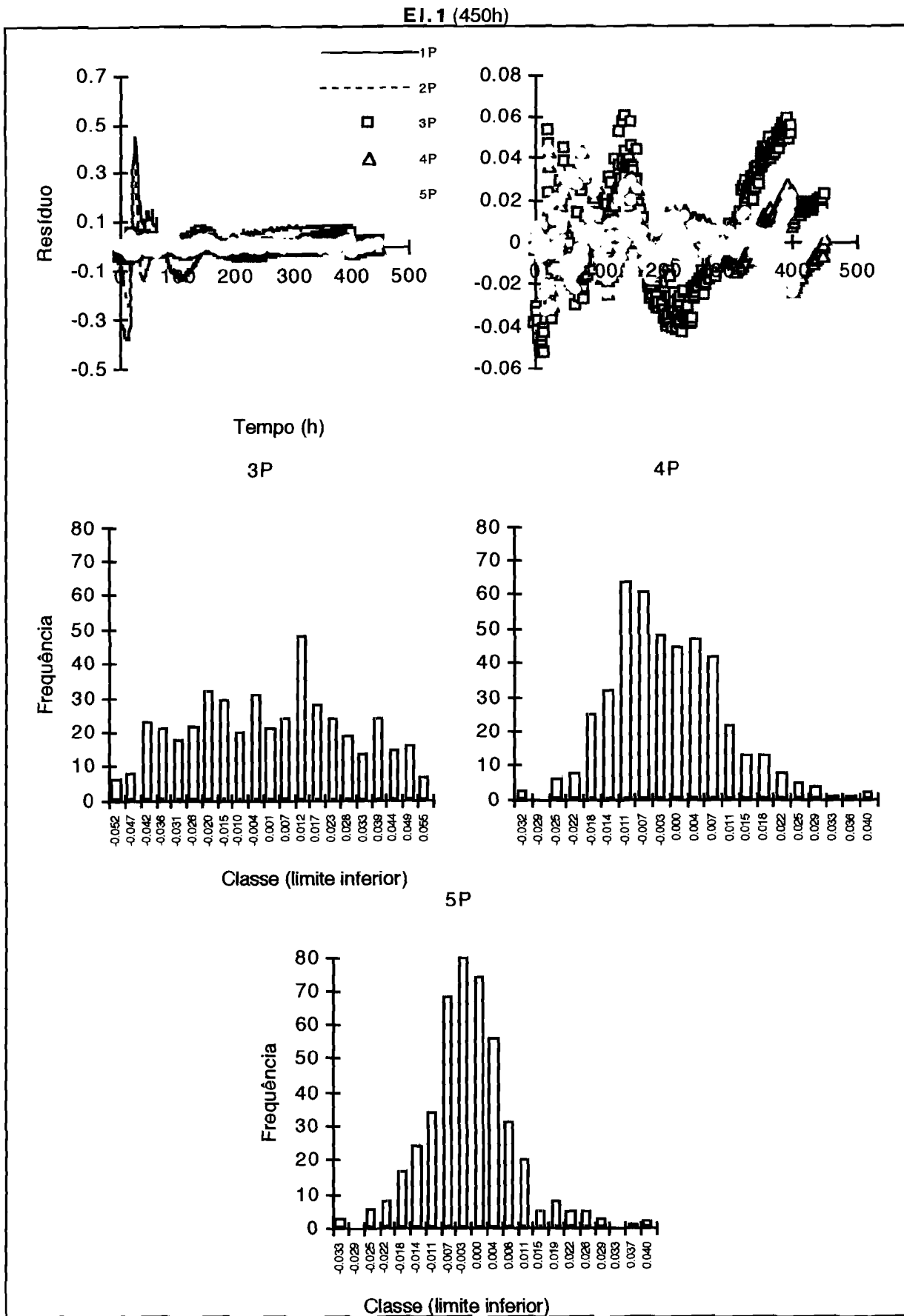


Figura 7.11- Análise de resíduos (EI.1- 450h)

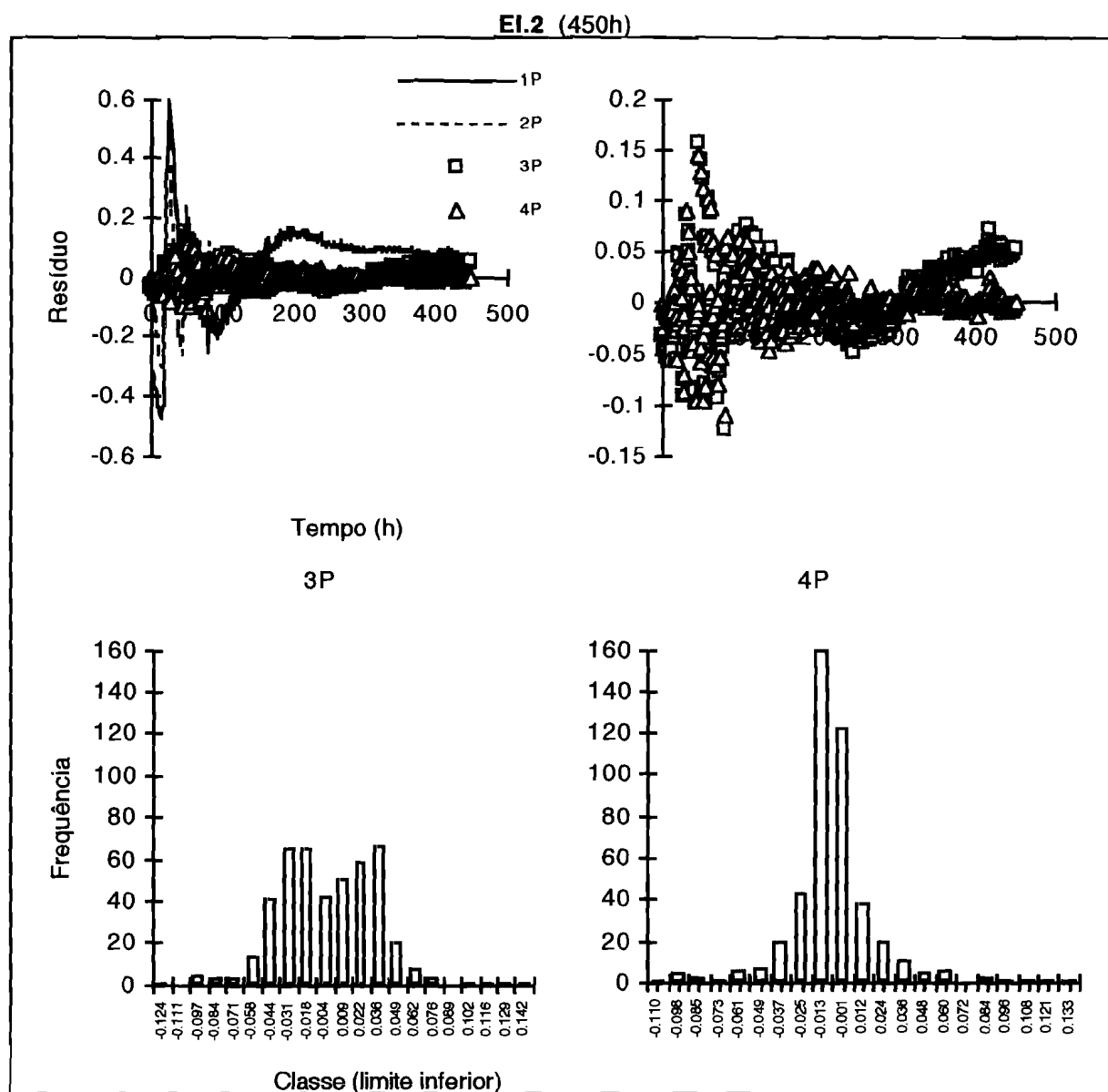


Figura 7.12- Análise de resíduos (EI.2- 450h)

Os parâmetros que caracterizam as populações I e II estabilizam desde que, no ajustamento, seja necessário considerar a terceira população (Figuras 7.14 e 7.15 e Quadros A.I.9 a A.I.17). Se o ensaio for prolongado para avaliar a hipótese da quinta população, as características das populações III e IV estabilizam como se verifica pelo ensaio EI.1 (450h): a consideração de uma quinta população não alterou a dimensão das populações III e IV. Os resultados do ajustamento do modelo ao ensaio EI.2 (450h), por si só, não permitem verificar se a consideração da quarta população estabiliza a terceira, por não ter sido possível o ajustamento de cinco populações. O facto das dimensões das populações III e IV nos dois ensaios serem semelhantes, justifica que se aceitem também os resultados relativos às populações III e IV do ensaio EI.2 (450h).

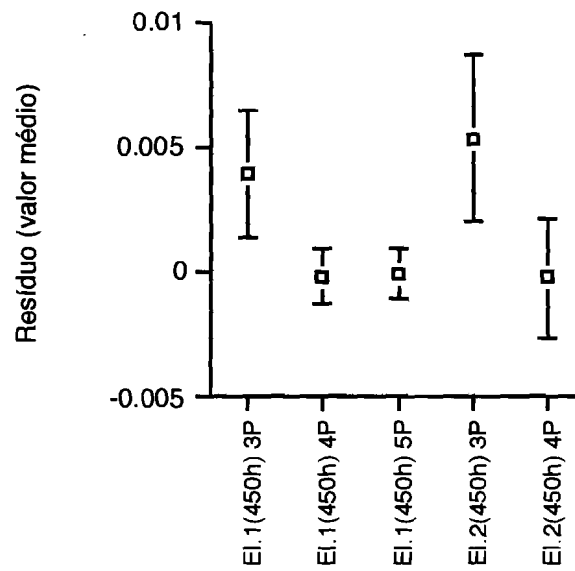


Figura 7.13- Valor médio dos resíduos (El.1- 450h e El.2- 450h)

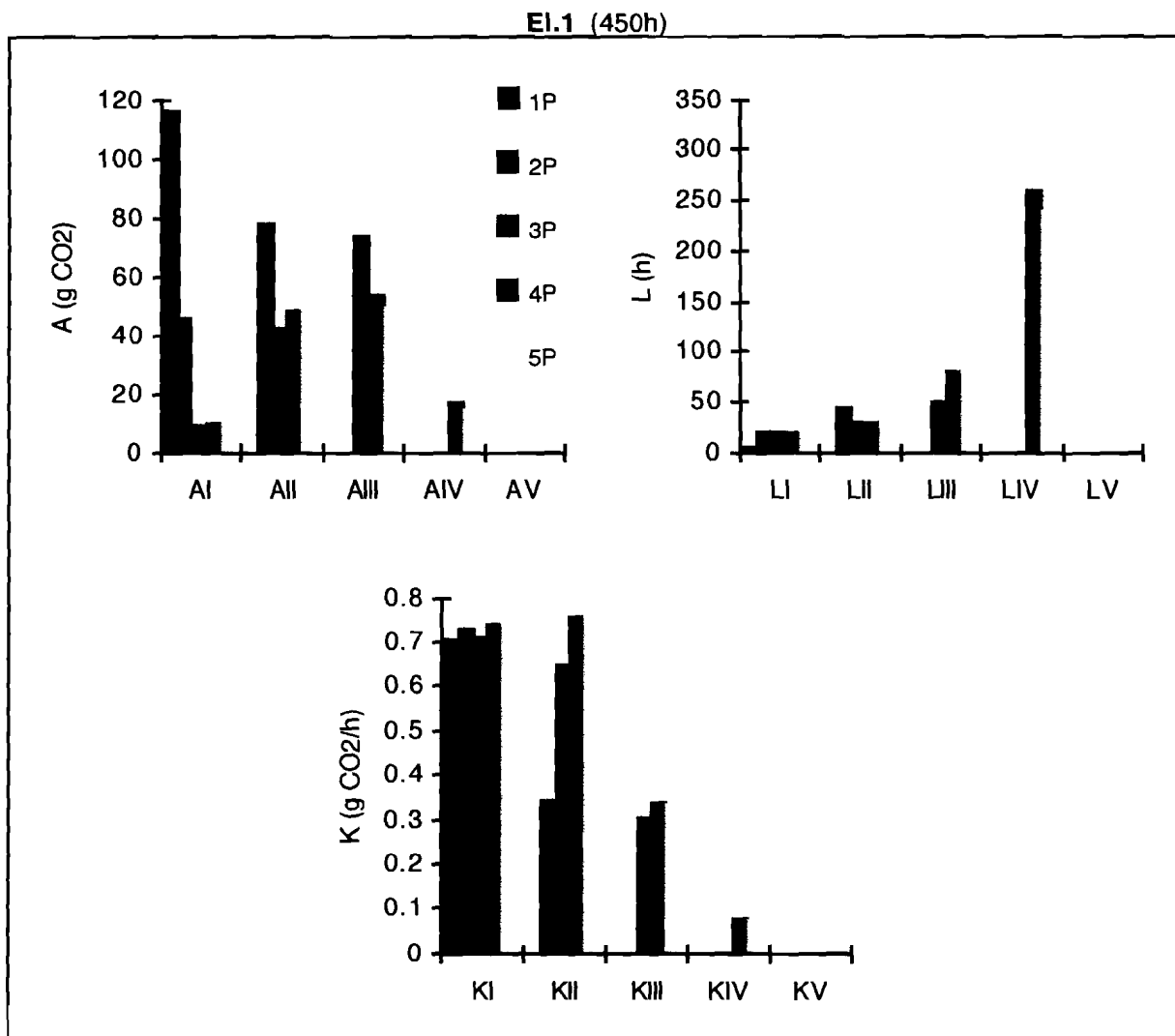


Figura 7.14- Estimativas dos parâmetros (El.1- 450h)

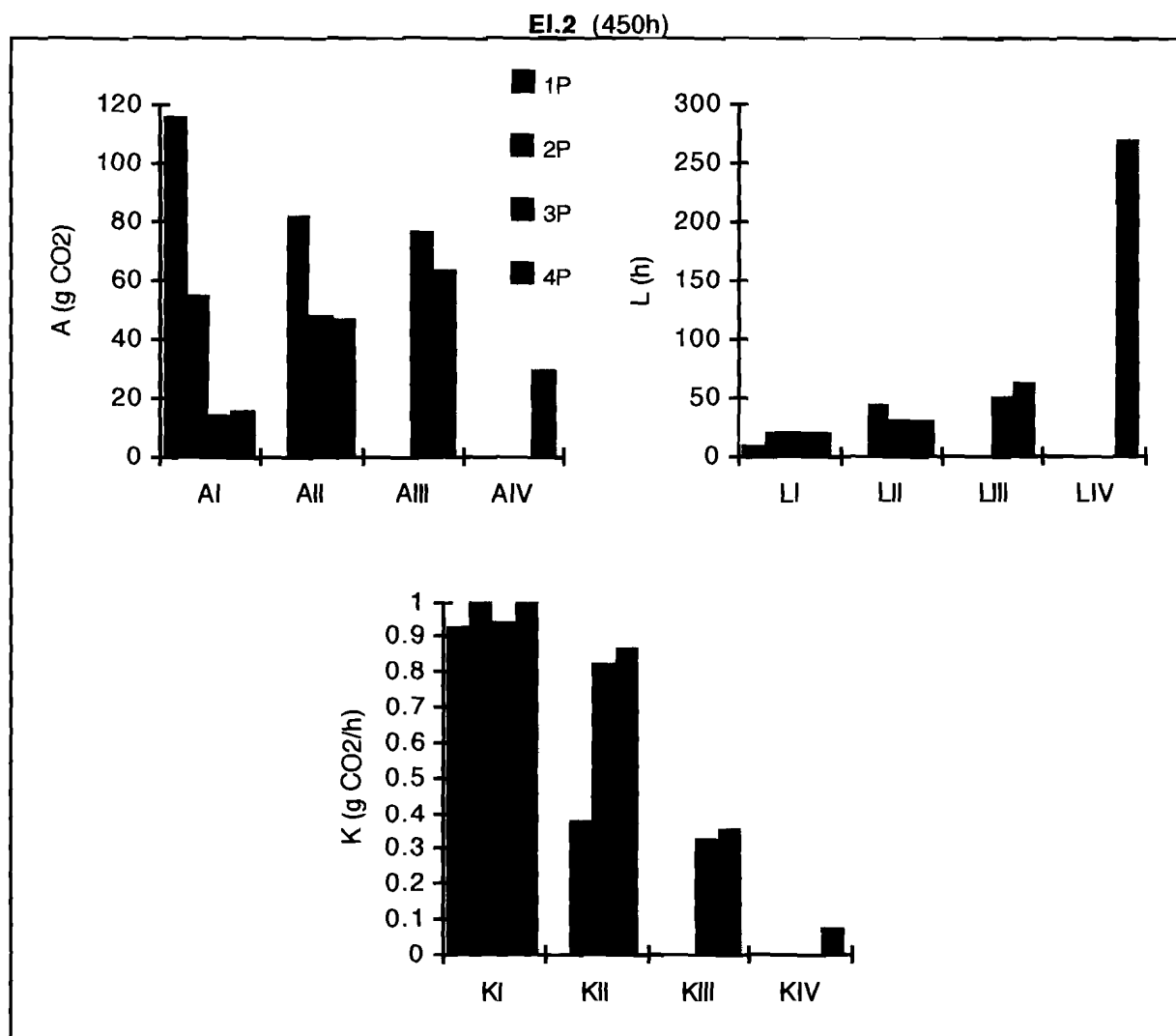


Figura 7.15- Estimativas dos parâmetros (EI.2- 450h)

A comparação dos ajustamentos através do teste da razão de verossimilhança indica que o acréscimo de uma população favorece sempre o modelo (Quadro 7.4). No caso do ensaio EI.1 (450h), considerando que a quinta população se desenvolve totalmente em simultâneo com a população IV, seleccionou-se a solução com quatro populações. No caso do ensaio EI.2 (450h) não há dúvidas quanto à melhor solução.

Quadro 7.4- Valor da estatística do teste da razão de verossimilhança- ensaios EI.1 (450h) e EI.2 (450h) (+)

	Solução			
	1P-2P	2P-3P	3P-4P	4P-5P
EI.1 (450h)	281.6	726.2	652.4	34.0
EI.2 (450h)	365.1	582.6	148.5	-

(+) Valor crítico $F_{3, \infty, 0.05} = 2.60$

Se se compararem as soluções escolhidas nos ensaios EI.1 (213h) e EI.2 (180h) com os mesmos ensaios prolongados até às 450 horas, verifica-se que há sobreposição total das respectivas populações no primeiro destes ensaios, enquanto que no ensaio EI.2 notam-se desvios, sobretudo nas populações II, III e IV (Figura 7.16).

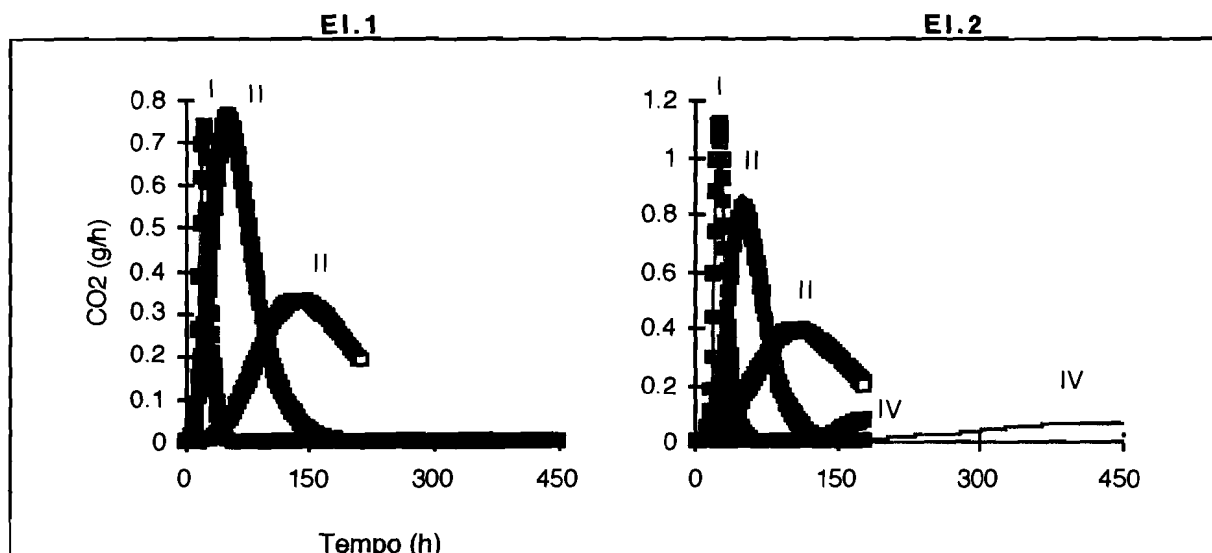


Figura 7.16- Dimensão das populações- soluções óptimas: EI.1 (213h) três populações, EI.2 (180h) quatro populações e EI.1 (450h) e EI.2 (450h) quatro populações(*)

A comparação de outras soluções traduz-se por desvios no ensaio EI.1 e sobreposição total das soluções do ensaio EI.2 (180h) três populações e ensaio EI.2 (450h) quatro populações (Figuras 7.17 e 7.18).

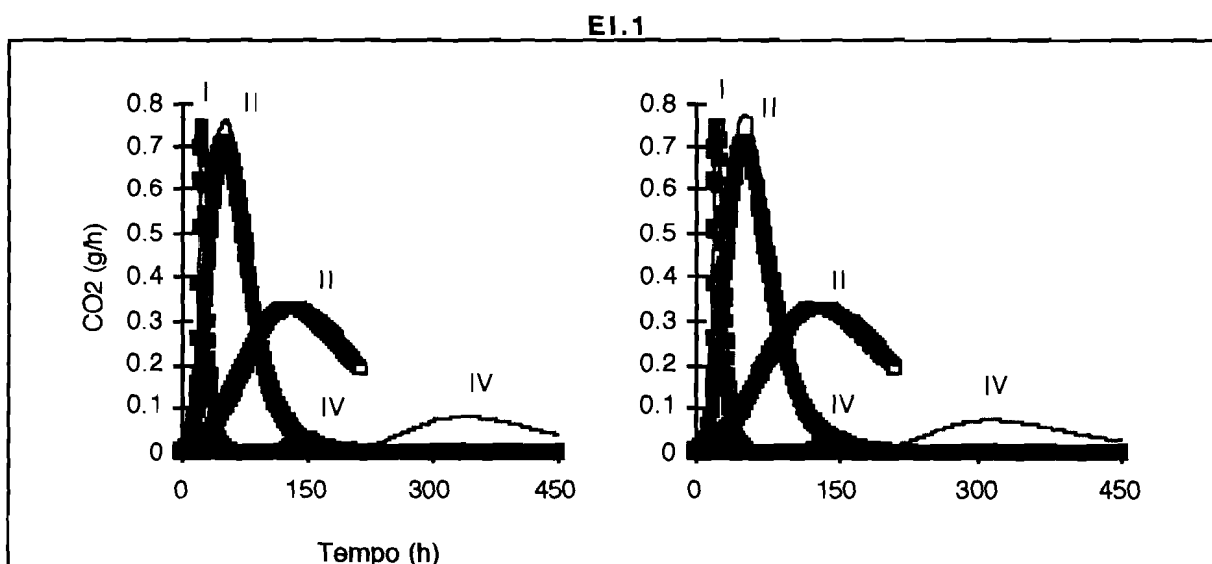


Figura 7.17- Dimensão das populações (EI.1): outras soluções(**)

(*) As marcas representam os ensaios até 213 ou 180 horas e as linhas a cheio representam os ensaios prolongados até 450 horas

(**) As marcas representam o ensaio até 213 horas quatro populações e as linhas a cheio representam o ensaio prolongado até 450 horas quatro e cinco populações

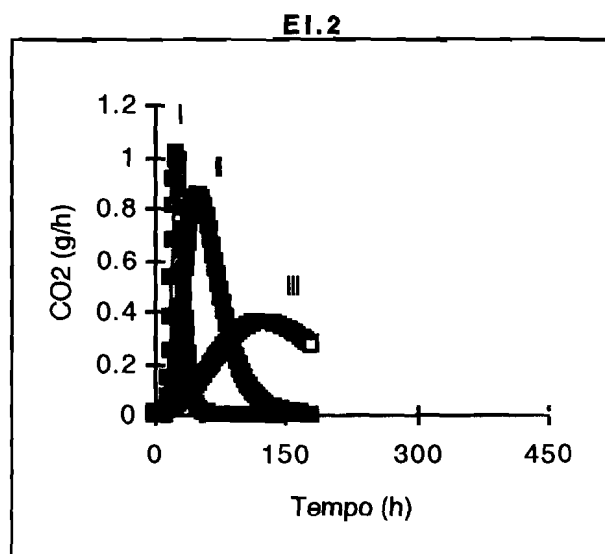


Figura 7.18- Dimensão das populações (EI.2): outra solução(*)

Os resíduos são praticamente coincidentes nas soluções dos ensaios EI.1 (213h) e EI.2 (180h) três populações e dos ensaios EI.1 (450h) e EI.2 (180h) quatro populações (Figura 7.19).

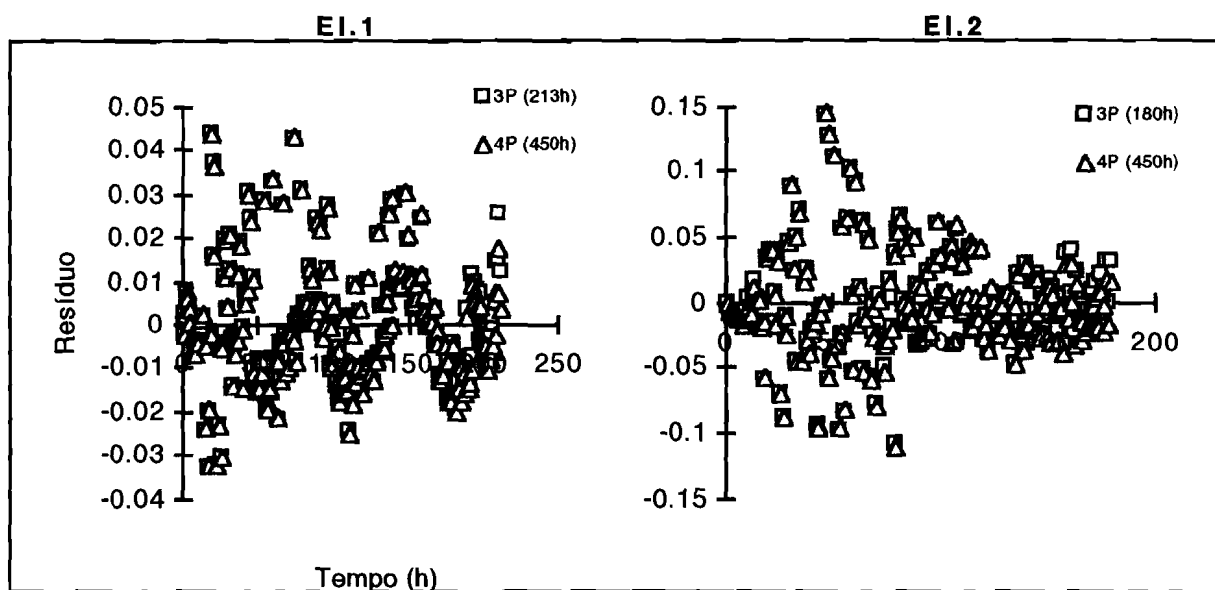


Figura 7.19- Resíduos: EI.1 (213h) e EI.2 (180h) três populações, e EI.1 (450h) e EI.2 (450h) quatro populações

No §7.3.2 "Número de populações", a hipótese com quatro populações foi considerada solução ótima para o ensaio EI.2, mas os dados agora referidos sugerem a escolha da solução com três populações.

(*) As marcas e as linhas a cheio representam respectivamente o ensaio até 180 horas três populações e o ensaio até 450 horas quatro populações

7.3.4 Efeito de temperatura

7.3.4.1 Ensaio a 25°C

Dada a duração dos ensaios realizados (190 a 260h), a procura da solução óptima apenas foi feita entre três e quatro populações (Figura 7.20). Nos ensaios EI.3 e EI.4, a consideração da quarta população, aparentemente, não trouxe benefícios ao ajustamento entre os valores de CO₂ observados e os valores estimados pelo modelo, desenvolvendo-se totalmente em simultâneo com outras populações (Figura A.I.1). Pelo contrário, no ensaio EI.5, mais prolongado, a quarta população melhorou o ajustamento na parte final, altura em que se começa a desenvolver. Nestes ensaios, a quarta população atrasa o crescimento das populações II e III (Figura A.I.2). De qualquer forma, exceptuando-se o ensaio EI.3, independentemente de se considerarem três ou quatro populações, estas crescem depois da população I.

O valor de r^2 , independentemente de serem três ou quatro populações, é maior ou igual a 0.99 (Quadro 7.5 e Quadros A.I.18 a A.I.23).

Quadro 7.5- r^2 - ensaios a 25°C

	n° de populações	
	3 P	4 P
EI.3 (190h)	0.996	0.997
EI.4 (225h)	0.993	0.994
EI.5 (260h)	0.988	0.990

Nos ensaios EI.3 e EI.4, o comportamento do resíduo não melhora significativamente com a quarta população (Figura 7.21): se no início parece haver uma distribuição aleatória, depois de aproximadamente 100 horas, o resíduo assume valores sequencialmente positivos e negativos em torno do eixo dos xx. No ensaio EI.5, a quarta população diminui o resíduo na fase final, mas a sua distribuição não é aleatória. Em todos estes ensaios, a distribuição do resíduo, aproxima-se de uma distribuição Normal quando se consideram três populações, e o acréscimo de uma população não se traduz por uma melhoria significativa (Figura 7.22). Acrescente-se que o valor médio do resíduo se aproxima de zero em todas as situações (Figura 7.23). Nos ensaios EI.3 e EI.4, a variância do resíduo aumenta com o valor de CO₂ estimado e no ensaio EI.5 é evidente a distribuição não aleatória do resíduo (Figura A.II.1).

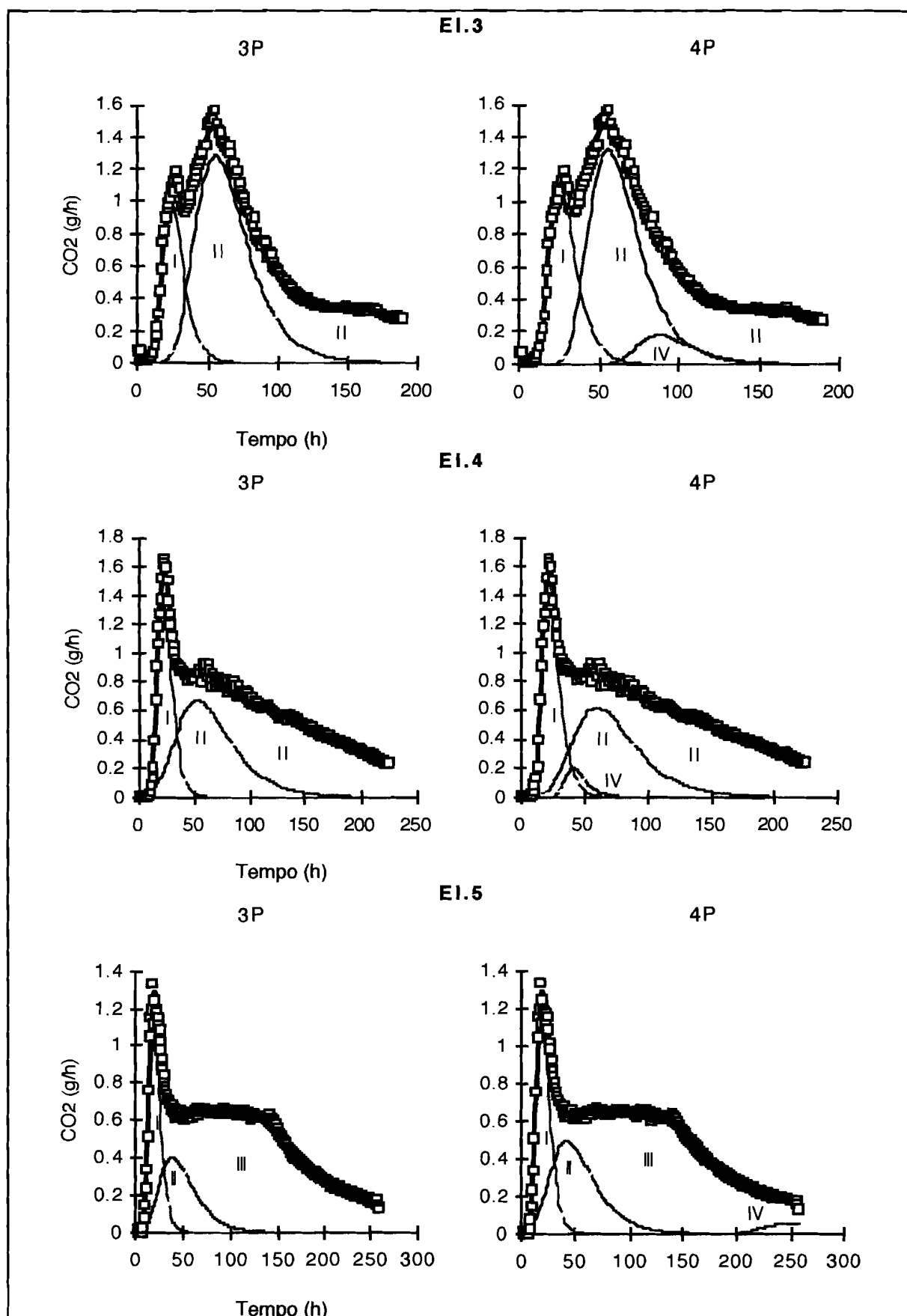


Figura 7.20- Modelo cinético de compostagem- ensaios a 25°C(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

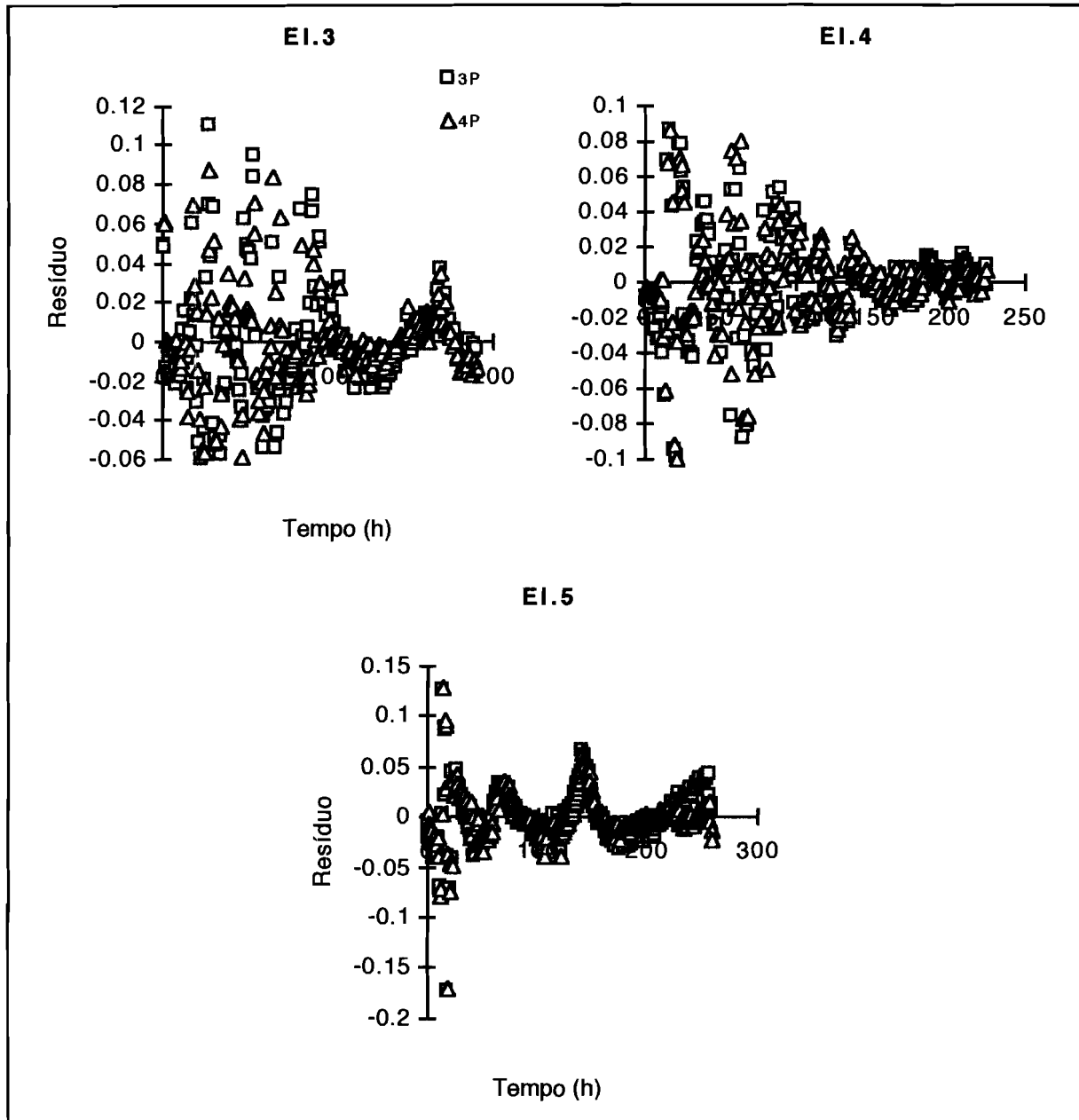


Figura 7.21- Análise de resíduos- ensaios a 25°C (1ª parte)

A escolha de três ou quatro populações não afecta significativamente as estimativas dos parâmetros que caracterizam as populações I, II e III (Figura 7.24). Os ensaios não foram suficientemente prolongados para permitir o mesmo tipo de análise em relação à população IV.

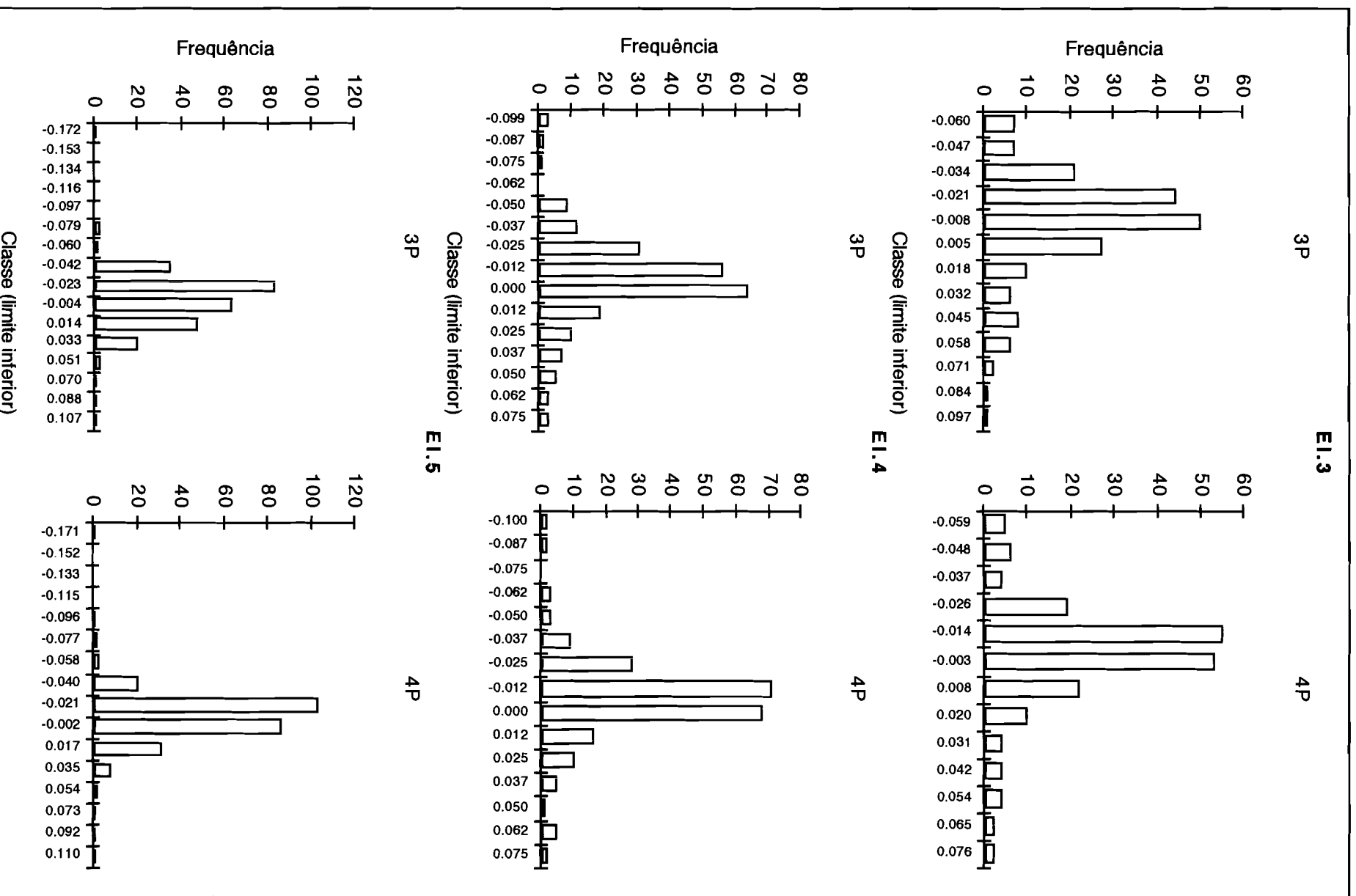


Figura 7.22- Análise de resíduos- ensaios a 25°C (2ª parte)

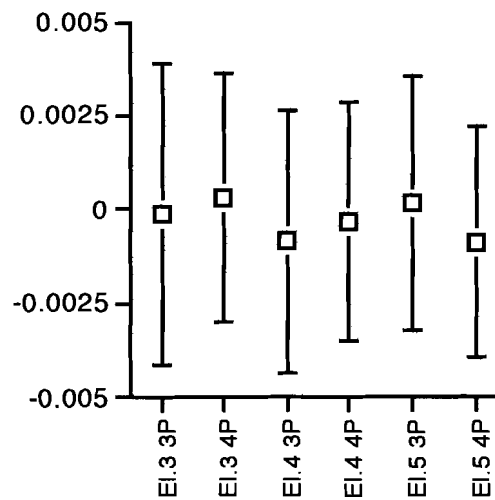


Figura 7.23- Valor médio dos resíduos- ensaios a 25°C

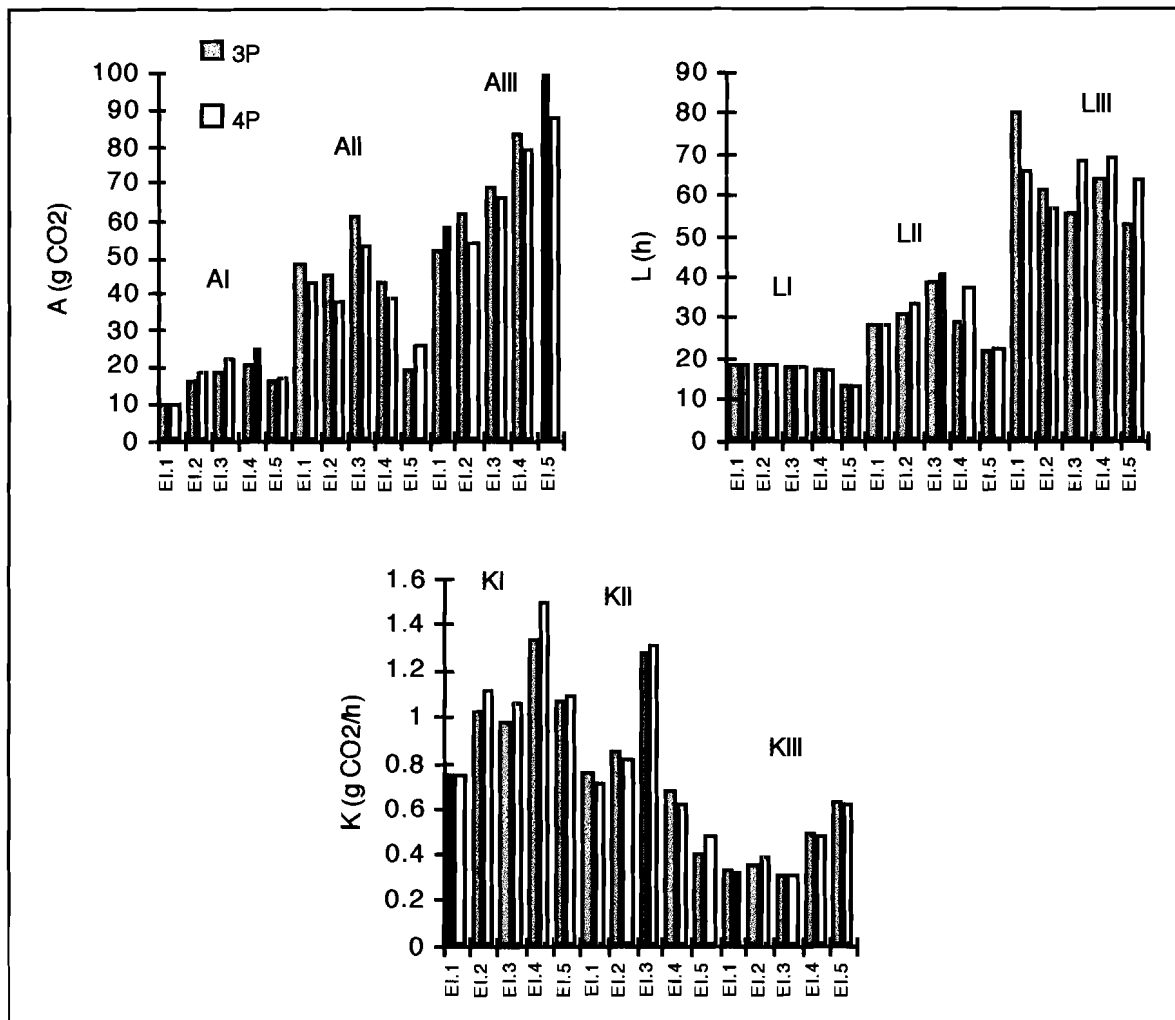


Figura 7.24- Estimativas dos parâmetros- ensaios a 25°C

A análise dos intervalos de confiança assintóticos para os parâmetros que caracterizam as populações, revela que no ensaio EI.4 quatro populações, dado que A_{IV} e K_{IV} podem assumir valores iguais ou inferiores a zero, a população IV pode não existir (Quadro A.I.21).

Apesar do teste da razão de verosimilhança indicar em todos os ensaios a melhor solução a que envolve quatro populações, Quadro 7.6, considerando que se rejeita a possibilidade de sobreposição de populações, os ajustamentos seleccionados correspondem aos ensaios EI.3 e EI.4 três populações e ensaio EI.5 quatro populações.

Quadro 7.6- Valor da estatística do teste da razão de verosimilhança- ensaios a 25°C (+)

Solução	
3P-4P	
EI.3 (190h)	26.3
EI.4 (225h)	14.1
EI.5 (260h)	18.4

(+) Valor crítico $F_{3,\infty,0.05}=2.60$

A variação das dimensões das populações que caracterizam os melhores ajustamentos resultam directamente da variação registada na evolução da taxa de produção de CO₂ sempre que se procedeu à repetição dos ensaios (Figuras 5.6 e 7.25).

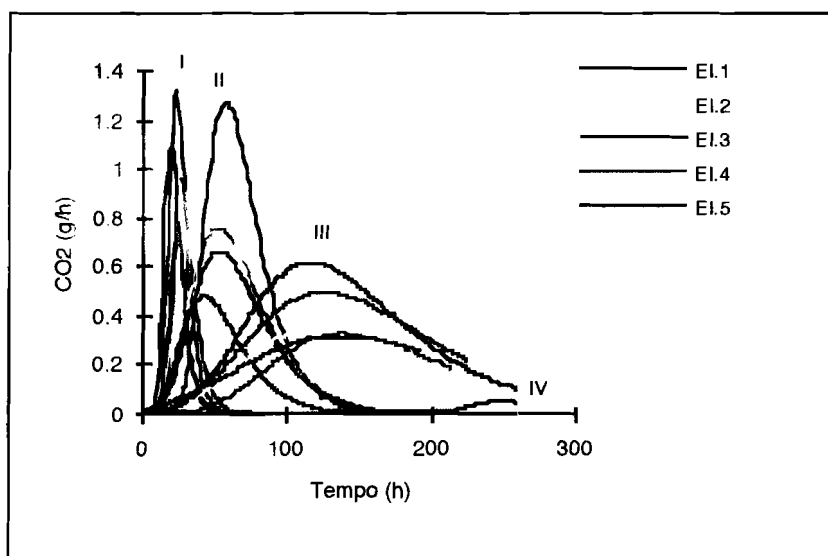


Figura 7.25 Dimensão das populações nos ensaios a 25°C (EI.1-213h, EI.2- 180h, EI.3 e EI.4 três populações, e EI.5 quatro populações)

De acordo com as observações relativas à alteração do aspecto macroscópico do substrato em compostagem associadas à evolução da taxa de produção de CO₂ (§5 "Resultados. Apresentação") e identificação de bolores (Quadro 5.9), a população I corresponde ao desenvolvimento de bactérias (Figura 7.25). A população II, para além de bactérias, caracteriza-se pelo crescimento de bolores, fundamentalmente da ordem Mucorales, notando-se o crescimento esporádico de *Penicillium* sp. (EI.5 59h). A população III, para além de bactérias, caracteriza-se pelo desenvolvimento de bolores do género *Penicillium*, que assumem um aspecto denso (EI.5 132h). A identificação, nessa fase do ensaio, de bolores da ordem

Mucorales associada à presença de clamidósporos nas hifas, sugere que a sua actividade é reduzida (Ingold, 1973). A identificação no ensaio EI.5 às 260 horas de bolores do género *Aspergillus*, associada ao crescimento localizado de *Penicillium* sp., e ainda Mucorales com actividade reduzida, sugere que a quarta população incluía, para além de bactérias, bolores do género *Aspergillus*.

7.3.4.2 Ensaaios a 40°C(*)

A variação da taxa de produção de CO₂ nos ensaios a 40°C e a sua duração, sugeriu a necessidade de se considerarem três ou quatro populações (Figura 7.26). Nos ensaios mais curtos (cerca de 100h) não é evidente o benefício da consideração da população IV (ensaos Ell.3 e Ell.6), enquanto que, nos outros ensaios, esta população melhora o ajustamento, sobretudo na fase final (ensaos Ell.1, Ell.2, Ell.4 e Ell.5, e E.A e E.B) (Figura A.1.3). A população IV desenvolve-se lentamente durante grande parte do ensaio (ensaos Ell.1, E.A e E.B), ou aparece na fase final (ensaos Ell.2 e Ell.4). A quantidade de CO₂ produzida pela população I é incipiente, verifica-se durante um curto período de tempo e pode mesmo não se distinguir, pelo que nos ensaios E.A e E.B se considerou apenas duas e três populações. Quando o primeiro máximo de CO₂ se distingue, o número de populações influencia a diferenciação da população I (ensaos Ell.2, Ell.3, Ell.4 e Ell.5) (Figura A.1.4).

No ensaio Ell.2 três populações, apesar de ter sido encontrada solução, as estimativas dos parâmetros que caracterizam a população I assumem valores incoerentes e no ensaio Ell.3 quatro populações, embora as estimativas dos parâmetros estejam de acordo com o que seria de esperar, os limites dos intervalos de confiança assintóticos são quase todos negativos (Quadros A.1.26 e A.1.29). Deste modo, estas soluções não foram consideradas, sem que isso constitua problema dado que, pela análise das Figuras 7.26 e A.1.3, é possível constatar que, no ensaio Ell.2, a quarta população melhora claramente o ajuste final e no ensaio Ell.3, a consideração de três populações parecem ser suficientes para conseguir o ajustamento.

No ensaio Ell.6, a quarta população não é necessária para melhorar o ajustamento e a sua consideração origina a reconfiguração das populações I, III e IV, que assumem um aspecto distinto relativamente ao conjunto de ensaios realizados, pelo que esta solução não foi considerada.

(*) Os ensaios E.A e E.B foram incluídos neste grupo de ensaios

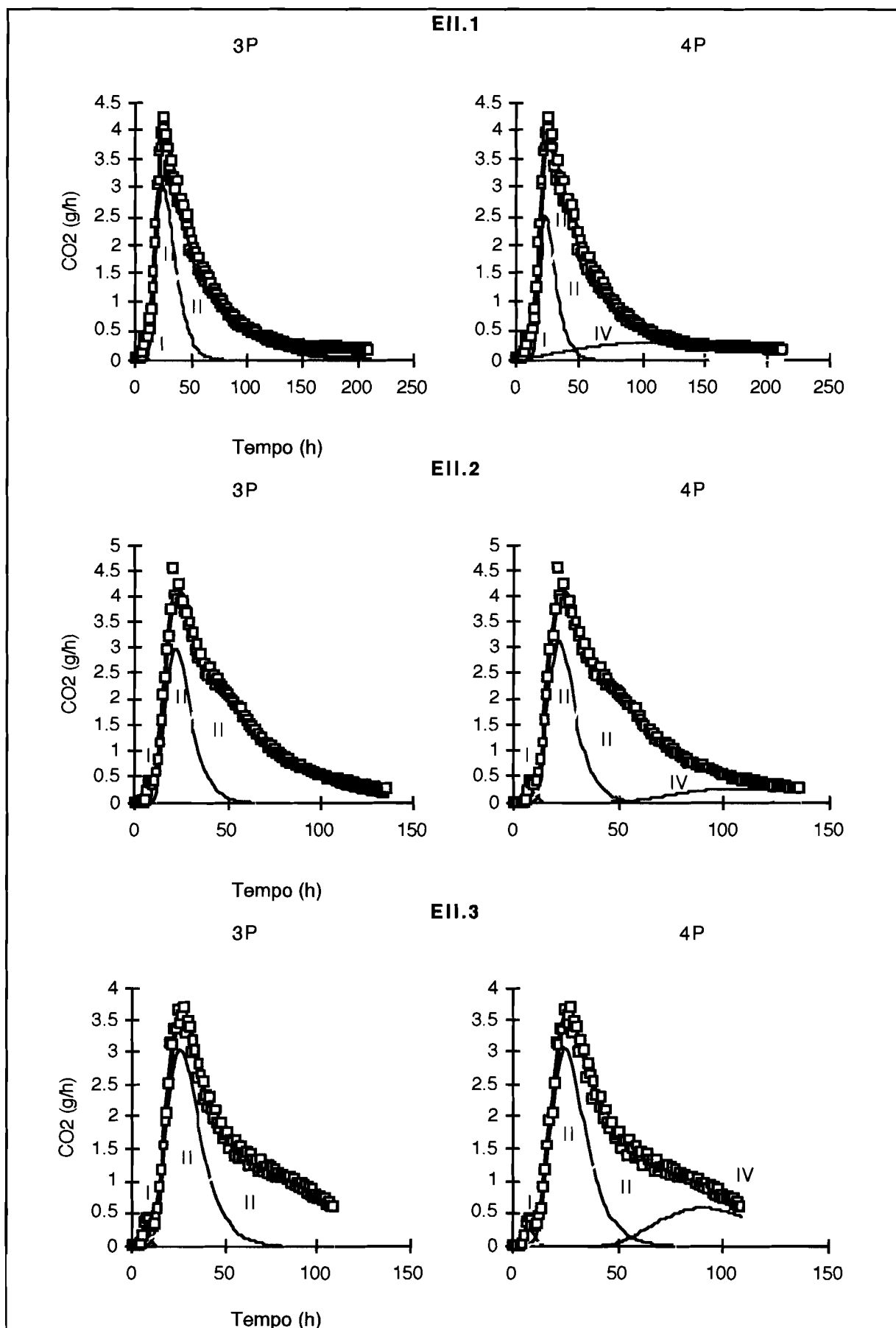


Figura 7.26- Modelo cinético de compostagem- ensaios a 40°C(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

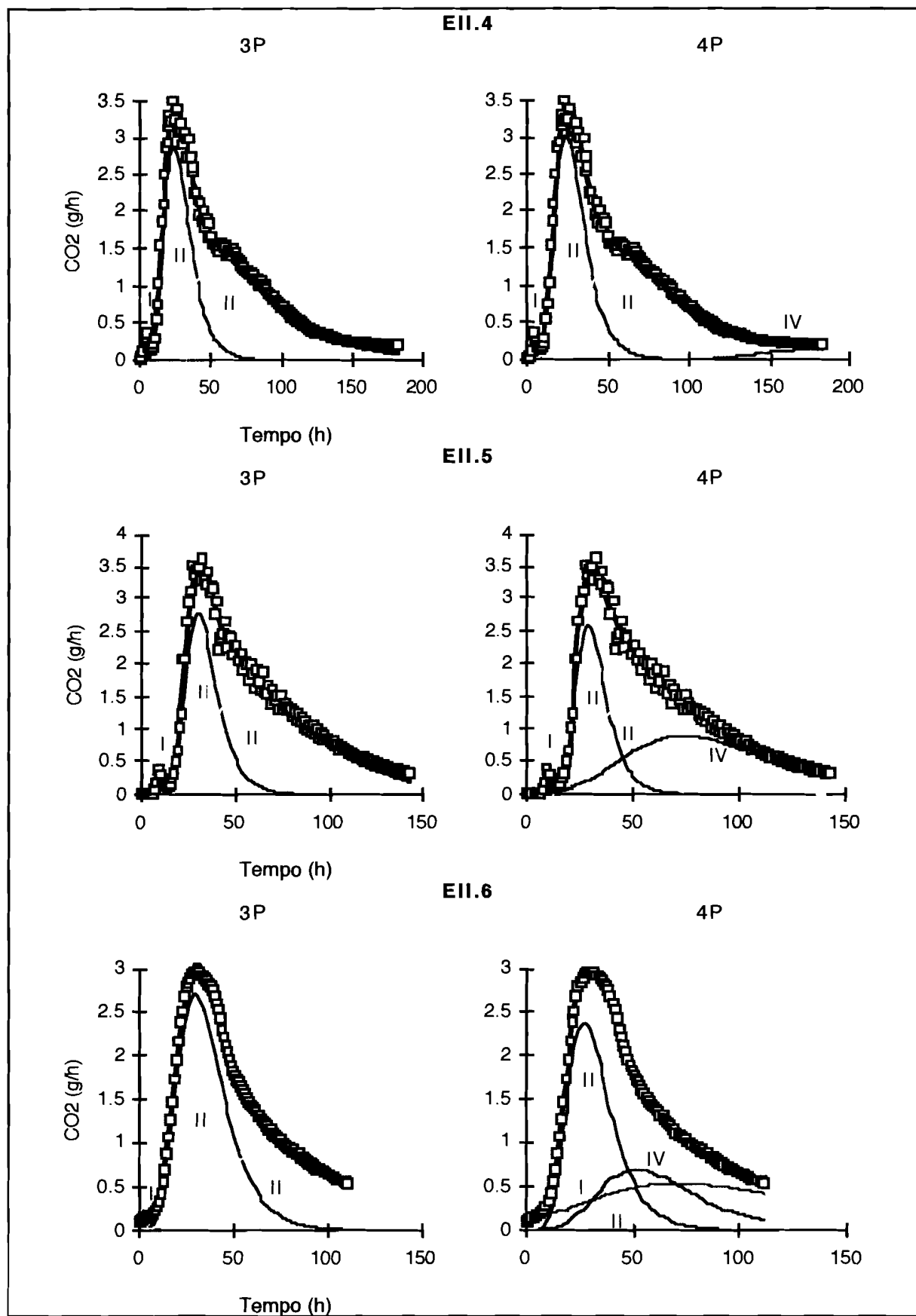


Figura 7.26- Modelo cinético de compostagem- ensaios a 40°C(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

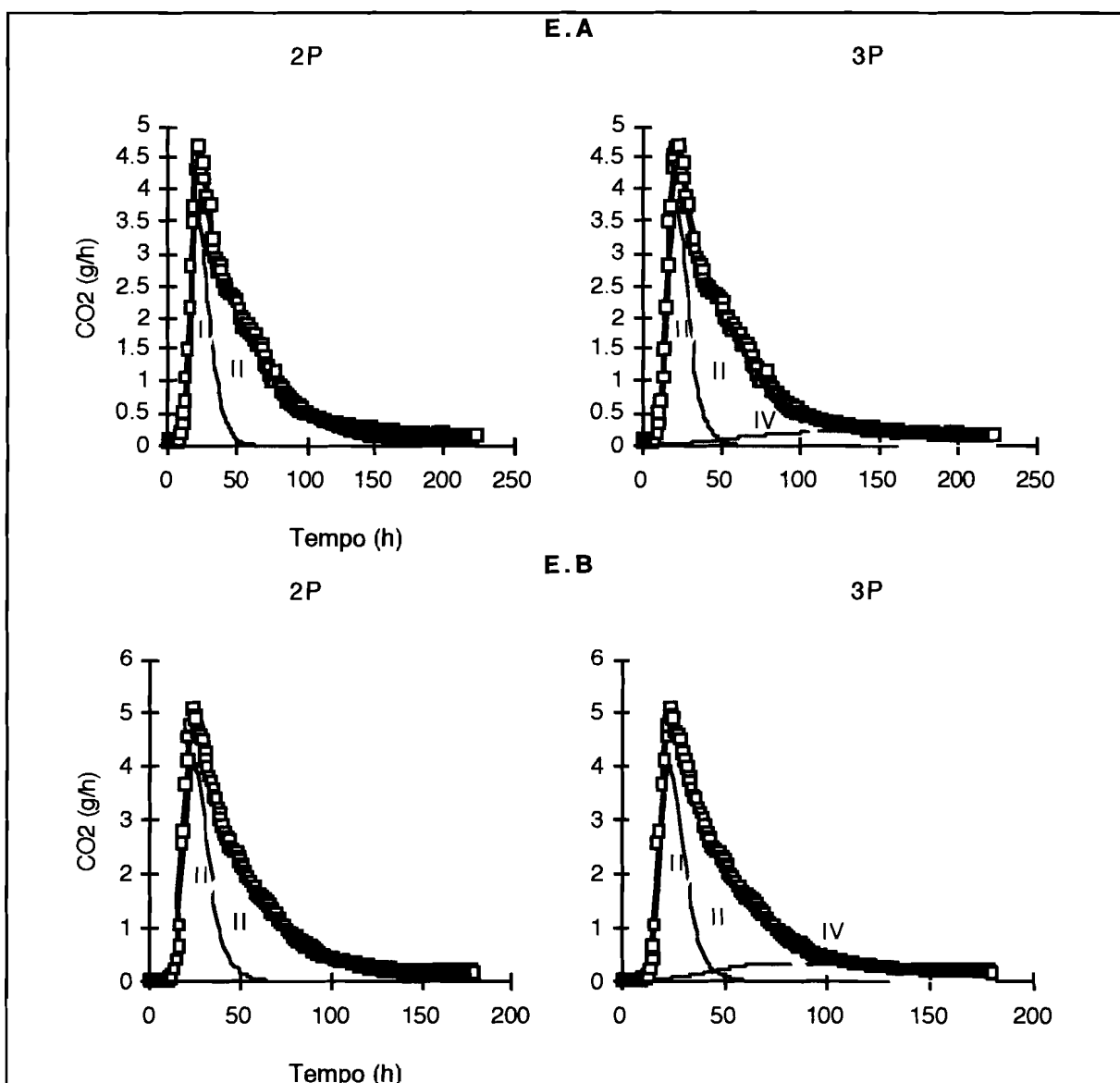


Figura 7.26- Modelo cinético de compostagem- ensaios a 40°C(*)

Os valores de r^2 são, exceptuando-se o ensaio EII.1 três populações, iguais ou maiores que 0.99 (Quadro 7.7 e Quadros A.II.24 a A.II.39).

Quadro 7.7- r^2 - ensaios a 40°C

	nº de populações	
	3 P	4 P
EII.1 (211h)	0.983	0.995
EII.2 (136h)		0.996
EII.3 (109h)	0.991	
EII.4 (183h)	0.992	0.994
EII.5 (143h)	0.986	0.991
EII.6 (111h)	0.998	
E.A (224h)+	0.988	0.998
E.B (180h)+	0.989	0.997

(+) Neste ensaio considerou-se a possibilidade de duas e três populações

(*) As marcas representam o CO2 observado e a linha a cheio espessa o CO2 estimado pelo modelo

Nos ensaios EII.1, EII.4 e EII.5, a distribuição do resíduo correspondente a três e quatro populações é inicialmente aleatória (até cerca de 50 horas) apresentando em seguida uma distribuição em torno do eixo dos xx, cuja amplitude é reduzida pelo acréscimo de uma população (Figura 7.27). As mesmas considerações são válidas para o ensaio E.A, mas a alternativa coloca-se entre duas ou três populações. No ensaio E.B, o resíduo apresenta uma distribuição temporal, apesar de diminuir, sobretudo a partir das 90h, com a terceira população. Enquanto que os ensaios EII.2 quatro populações e EII.6 três populações têm um comportamento semelhante aos anteriores (só aleatório na fase inicial), o ensaio EII.3 três populações, caracteriza-se por uma distribuição aleatória do resíduo.

A consideração da população IV é indispensável para que nos ensaios EII.1, E.A e E.B, a distribuição de frequências do resíduo e o seu valor médio se aproximem respectivamente de uma distribuição Normal e de zero (Figuras 7.28 e 7.29). Nas outras situações, estes pressupostos são cumpridos. Na caracterização da variância, nota-se o comportamento não aleatório do resíduo, com as exceções dos ensaios EII.1, EII.2 e EII.5 quatro populações, e EII.3 três populações, que aumenta com o valor de CO_2 estimado (Figura A.II.2).

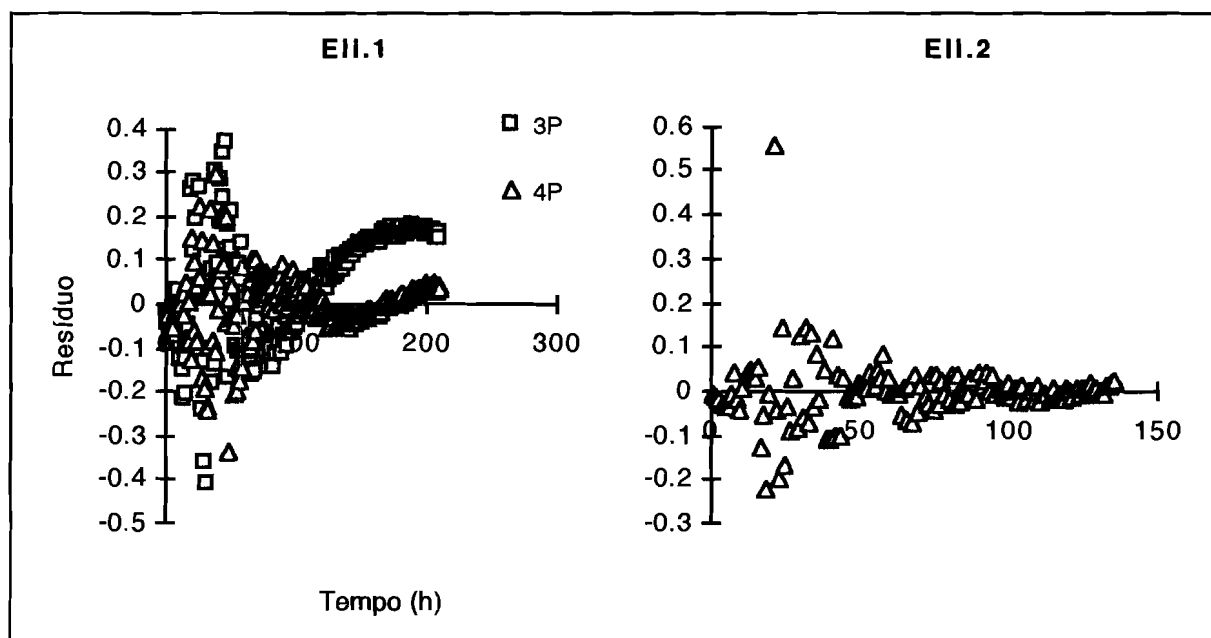


Figura 7.27- Análise de resíduos- ensaios a 40°C (1ª parte) (continua)

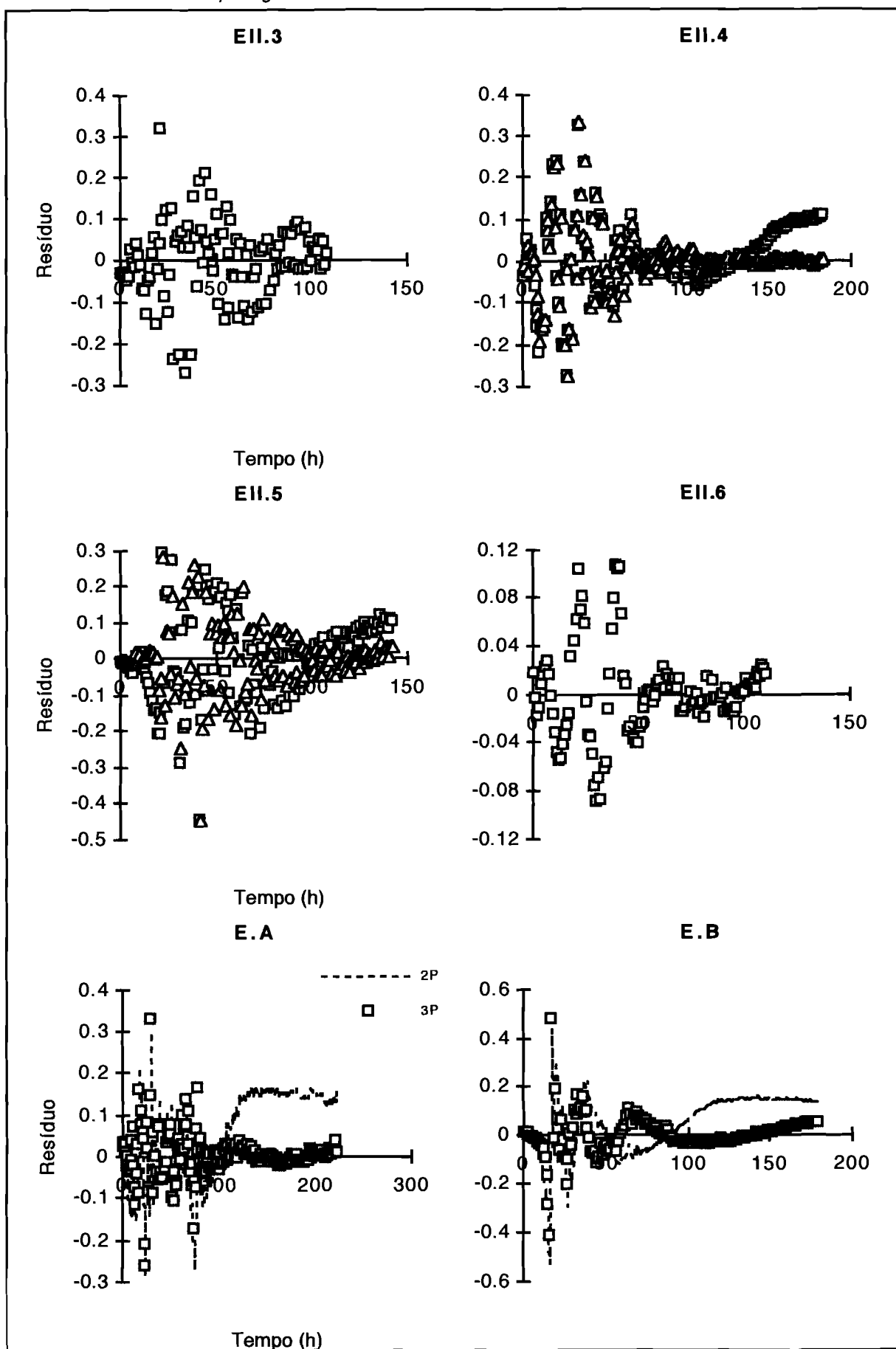


Figura 7.27- Análise de resíduos- ensaios a 40°C (1ª parte)

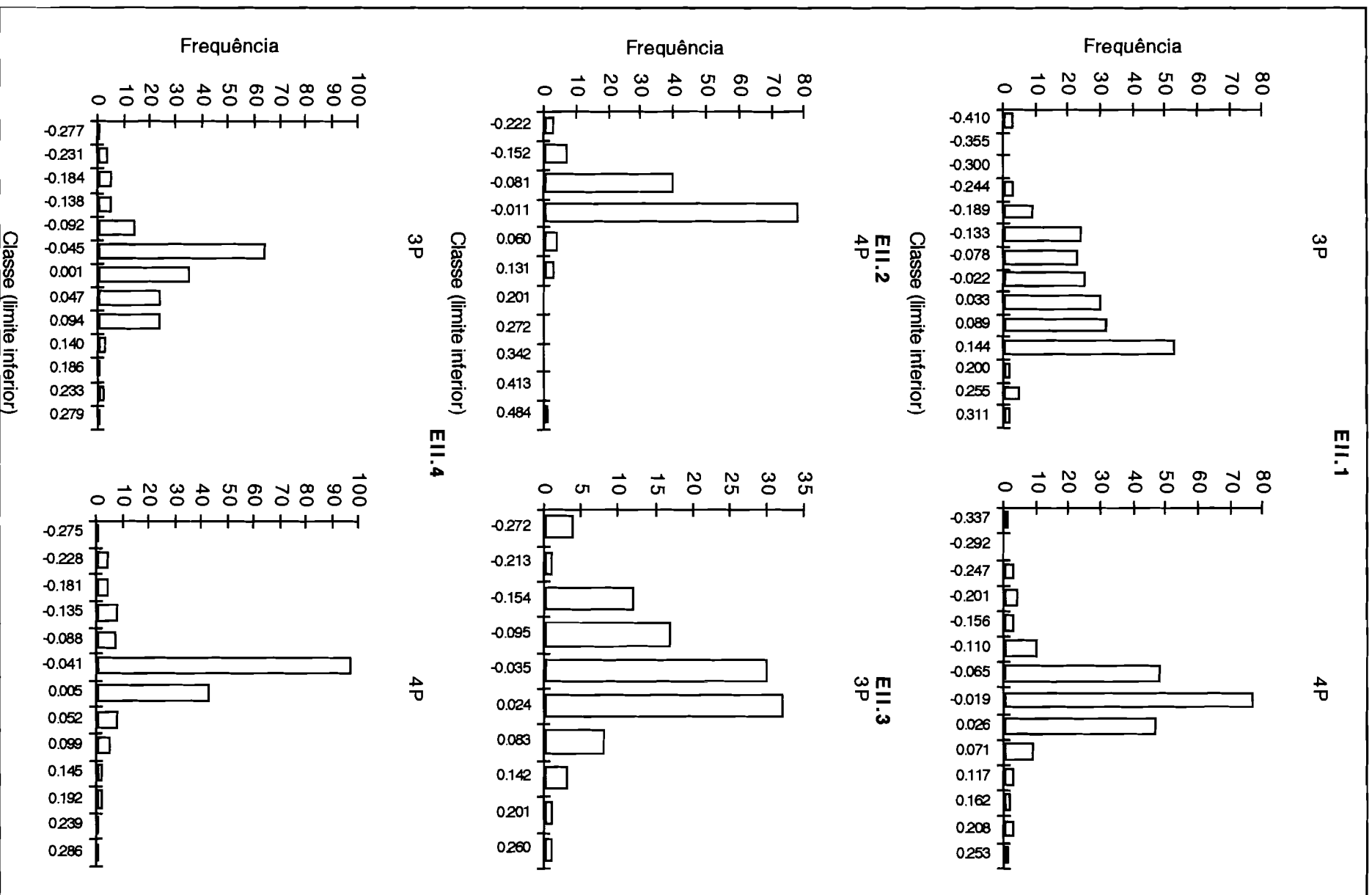


Figura 7.28- Análise de resíduos- ensaios a 40°C (2ª parte) (continua)

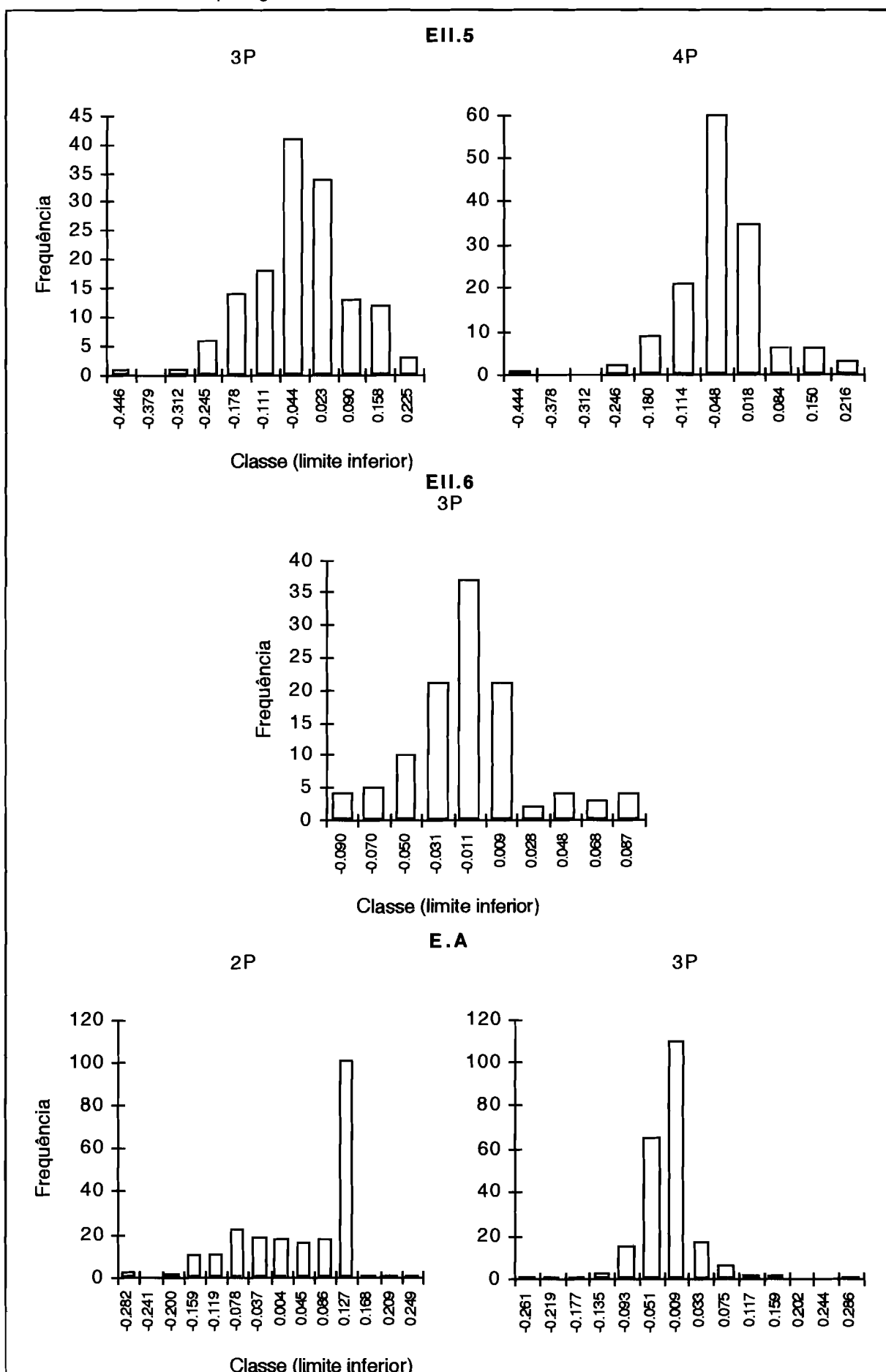


Figura 7.28- Análise de resíduos- ensaios a 40°C (2ª parte) (continua)

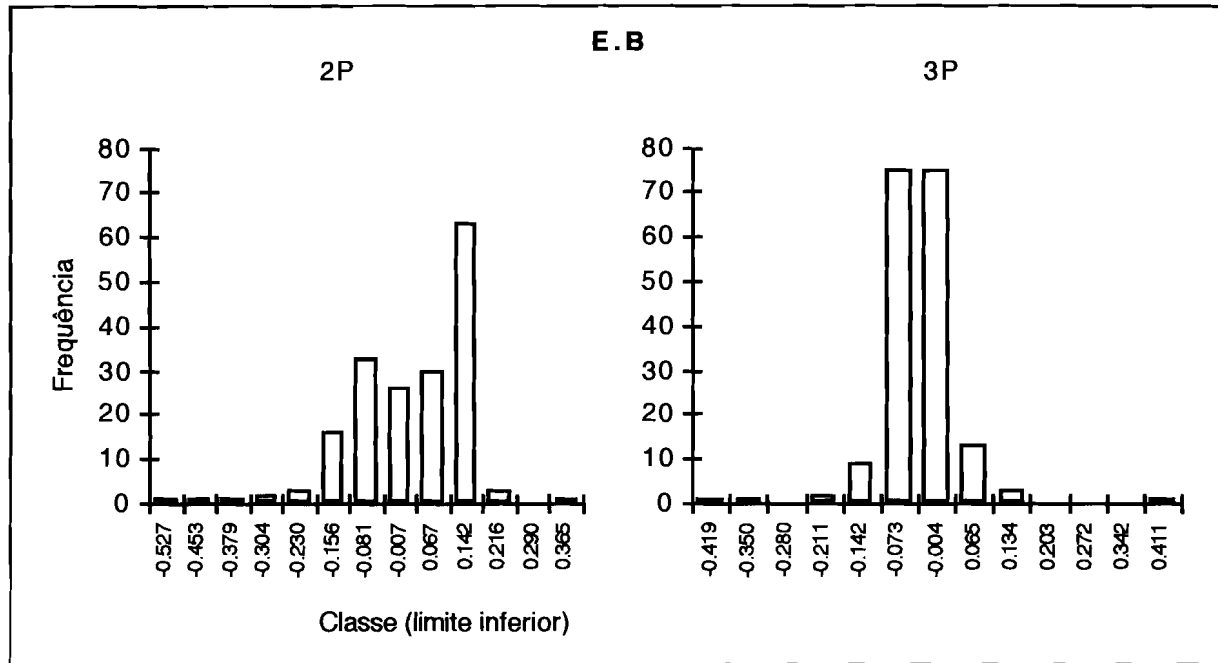


Figura 7.28- Análise de resíduos- ensaios a 40°C (2ª parte)

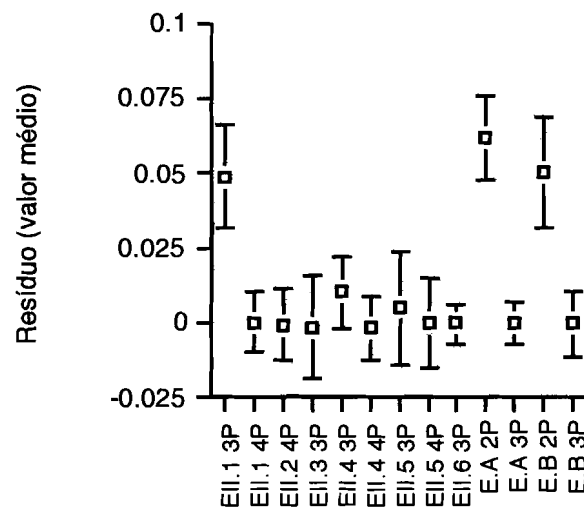
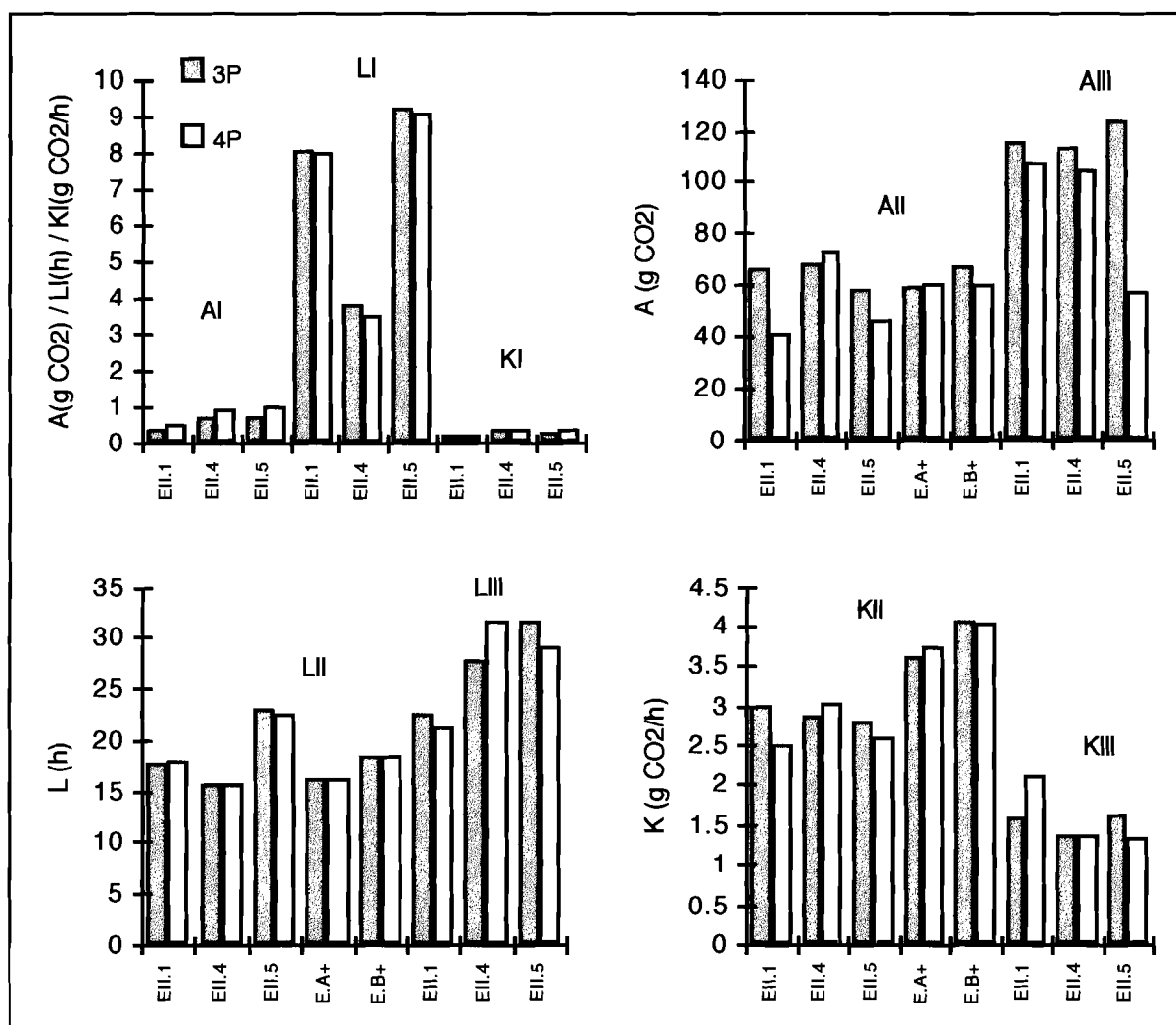


Figura 7.29- Valor médio dos resíduos- ensaios a 40°C

Da análise da influência do número de populações na respectiva dimensão, sobressai a diferença na estimativa de A_I no ensaio EII.1 e A_{III} nos ensaios EII.5, E.A e E.B, consoante se considerem três ou quatro populações (isto é, duas ou três populações nos ensaios E.A e E.B) (Figura 7.30).



(+) Neste ensaio a legenda diz respeito a duas e três populações

Figura 7.30- Estimativas dos parâmetros- ensaios a 40°C

Nos ensaios EII.1, EII.2 e EII.6, A_I , L_I e K_I podem assumir valores negativos (Quadros A.I.24, A.I.25, A.I.27 e A.I.34). Os intervalos de confiança assintóticos de L_{IV} ou A_{IV} não permitem rejeitar a hipótese do parâmetro ser nulo, nos ensaios onde a população IV surge, respectivamente, no início (Quadros A.I.25, A.I.37 e A.I.39), ou na fase final (excepção: ensaio EII.2) (Quadros A.I.27 e A.I.31). As estimativas de A_{III} e K_{III} no ensaio EII.5 quatro populações, também podem ser negativas (Quadro A.I.33).

Nos ensaios EII.1, EII.4, E.A e E.B, os ajustamentos seleccionados são os que consideram a população IV, o que está de acordo com os resultados do teste da razão de verosimilhança(Quadro 7.8).

Quadro 7.8- Valor da estatística do teste da razão de verosimilhança- ensaios a 40°C (+)

Solução	
3P-4P	
EII.1 (211h)	160.3
EII.4 (183h)	22.1
EII.5 (143h)	23.3
E.A (224h)+ +	327.5
E.B (180h)+ +	133.7

(+) Valor crítico $F_{3,\infty,0.05}=2.60$

(+ +) Neste ensaio considerou-se duas e três populações

No ensaio EII.5 era necessária a quarta população para melhorar o ajustamento de forma evidente, mas os algoritmos usados não permitiram encontrar uma solução biologicamente coerente (a população III pode não existir) (Quadro A.I.33).

A sobreposição dos ajustamentos seleccionados mostra que a população I tem uma actividade reduzida a 40°C, podendo mesmo não se desenvolver quando a temperatura do substrato é superior a este limiar (E.A e E.B), sendo rapidamente substituída pela população II (Figura 7.31).

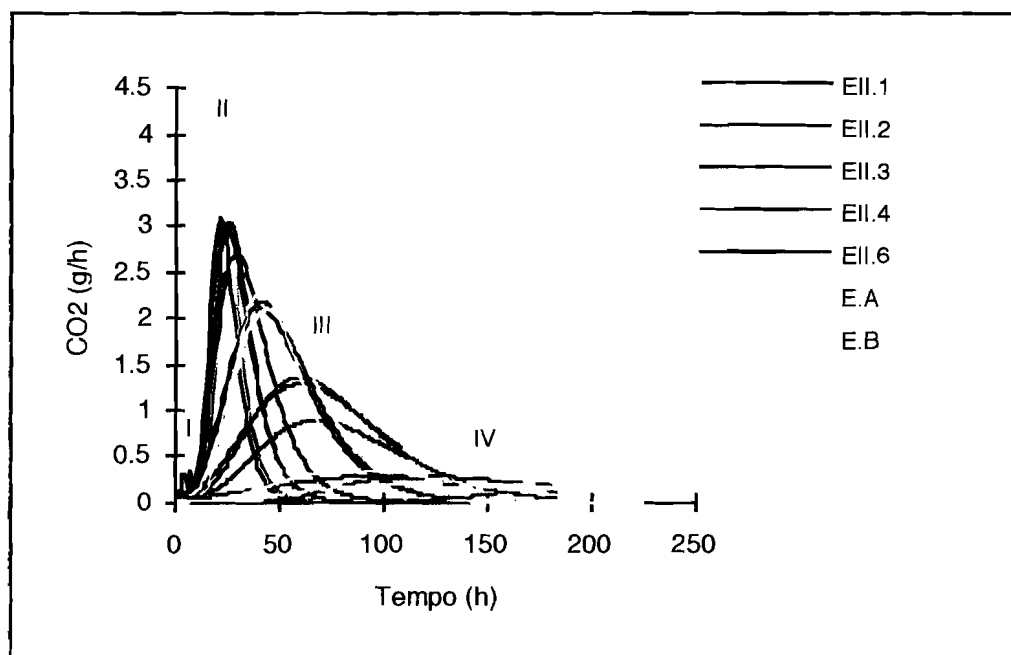


Figura 7.31 Dimensão das populações nos ensaios a 40°C (EII.3 e EII.6 três populações, e EII.1, EII.2, EII.4, E.A e E.B quatro populações)

De acordo com as observações de alteração do aspecto macroscópico do substrato em compostagem, associadas à evolução da taxa de produção de CO₂ (§5 "Resultados. Apresentação") e identificação de bolores (Quadro 5.9), a população I corresponde ao desenvolvimento de bactérias (EII.6 8h) (Figura 7.31).

7. Modelo Cinético de Compostagem

A população II, para além de bactérias, caracteriza-se pelo desenvolvimento espectacular de micélio vegetativo que, em certas situações, germinou, distinguindo-se bolores da ordem Mucorales (Ell.6 14h e 37h). A população III corresponde ao desenvolvimento de bactérias e bolores do género *Aspergillus* (Ell.6 111h), cuja presença já tinha sido observada antes (Ell.6 37h).

A hipótese de quatro populações no ensaio Ell.6 foi eliminada à partida, porque a população I desenvolvia-se durante todo o ensaio, o que está em desacordo com as observações de alteração do aspecto macroscópico do substrato e de desenvolvimento de máximos de CO₂.

7.3.4.3 Ensaios a 25-40°C

Para os ensaios a temperatura variável (25-40°C), procedeu-se como anteriormente, analisando o ajustamento de três e quatro populações (Figura 7.32). A consideração da quarta população melhora o ajustamento na fase final do ensaio EIII.1, mas não interfere nos ensaios EIII.2 e EIII.3 (Figura A.I.5). No ensaio EIII.2, a quarta população desenvolve-se totalmente em simultâneo com as outras populações e no ensaio EIII.3 corresponde à divisão da população III. A quarta população melhora no ensaio EIII.1 o ajuste inicial do modelo (Figura A.I.6). O início da população III no ensaio EIII.1 varia substancialmente com o número de populações, crescendo significativamente antes das populações I e II, quando só são consideradas três populações. Nos ensaios EIII.2 e EIII.3, o número de populações não altera o início relativo das populações I, II e III e, no último destes ensaios, a população III começa a crescer depois das populações I e II.

Nos ensaios EIII.2 e EIII.3 quatro populações, apesar dos algoritmos terem convergido para uma solução e as estimativas dos parâmetros terem assumido valores aceitáveis relativamente às soluções com três populações, os intervalos de confiança assintóticos assumem valores incoerentes: no ensaio EIII.2 não só a quarta população pode não existir (A_{IV} e K_{IV} podem ser negativos) como também a população II (A_{II} negativo) e no ensaio EIII.3 os limites inferiores dos intervalos de confiança assintóticos dos parâmetros que caracterizam as populações III e IV são negativos (Quadros A.I.43 e A.I.45). Deste modo, estas soluções não foram consideradas, sem que isso constitua problema, dado que pela análise das Figuras 7.32, A.I.5 e A.I.6 é possível constatar que a quarta população não melhora os ajustamentos.

Os valores de r^2 são, à excepção do ensaio EIII.2, superiores a 0.99 (Quadro 7.9 e Quadros A.I.40 a A.I.42 e A.I.44).

Quadro 7.9- r^2 - ensaios a 25-40°C

	nº de populações	
	3 P	4 P
EIII.1 (181h)	0.991	0.996
EIII.2 (165h)	0.982	
EIII.3 (158h)	0.991	

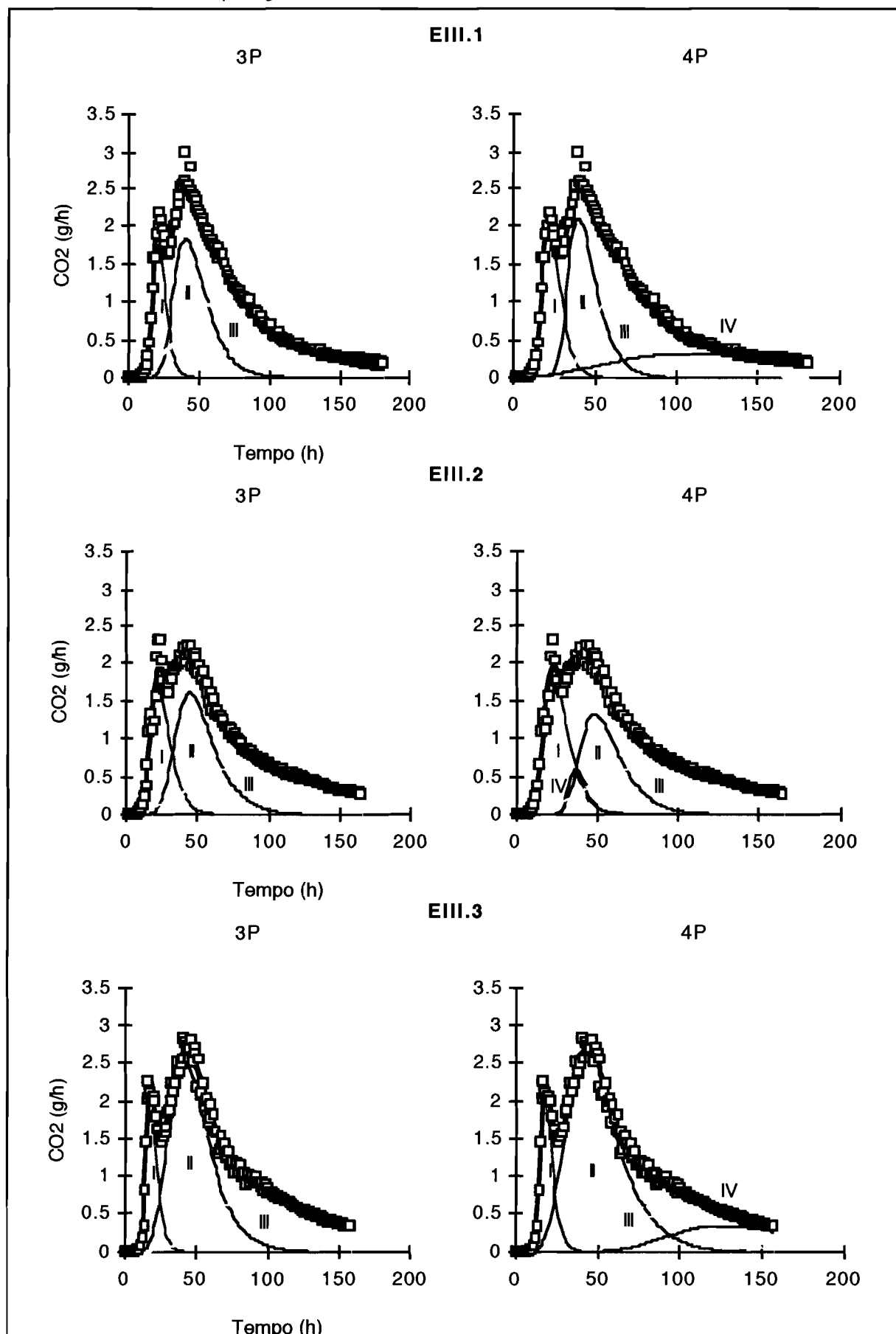


Figura 7.32- Modelo cinético de compostagem- ensaios a 25-40°C(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

No ensaio EIII.1, a consideração da quarta população reduz o resíduo e torna a sua distribuição aparentemente aleatória nas primeiras 100 horas (Figura 7.33). Nos ensaios EIII.2 e EIII.3 três populações verifica-se, como anteriormente, a distribuição parcialmente aleatória do resíduo. A normalidade da distribuição de frequências do resíduo não melhora com a quarta população no ensaio EIII.1 (Figura 7.34). O valor médio do resíduo está próximo de zero nos ensaios EIII.2 e EIII.3 três populações, e no ensaio EIII.1, sobretudo quando se consideram quatro populações (Figura 7.35). A variância do resíduo parece ser constante no ensaio EIII.1 quatro populações e aumentar com o valor de CO_2 estimado nos ensaios EIII.2 e EIII.3 (Figura A.I.3).

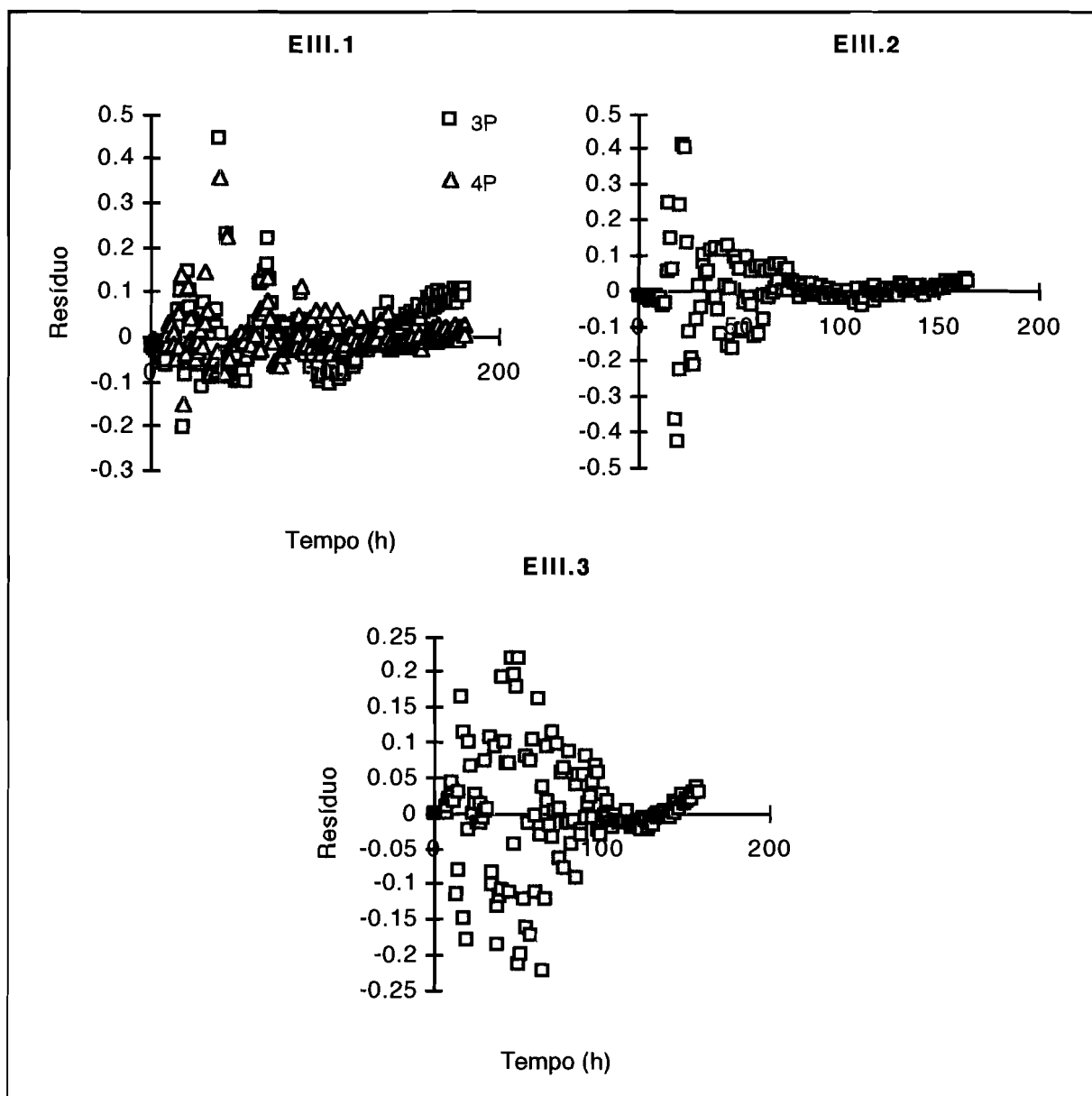


Figura 7.33- Análise de resíduos- ensaios a 25-40°C (1ª parte)

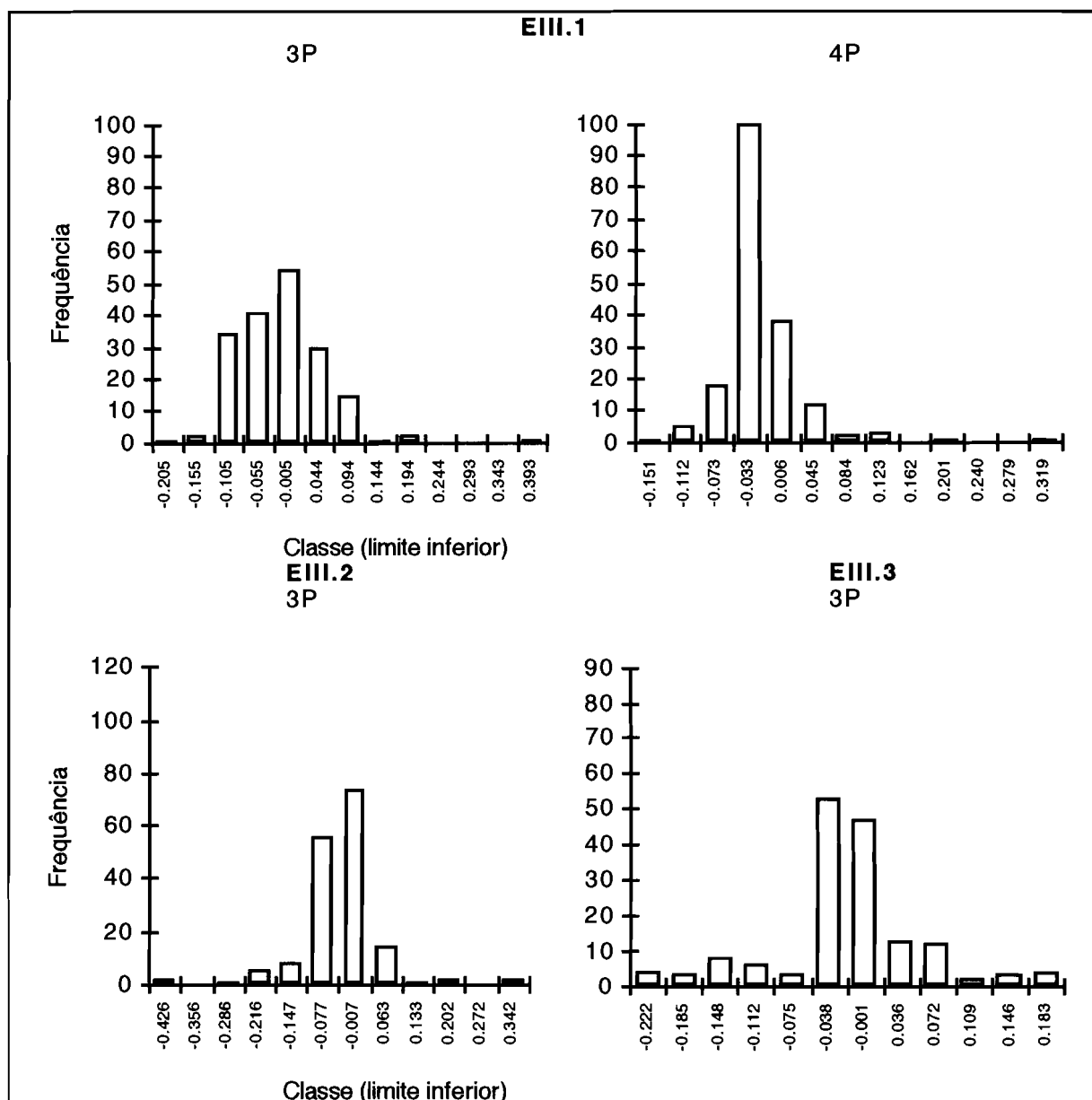


Figura 7.34- Análise de resíduos- ensaios a 25-40°C (2ª parte)

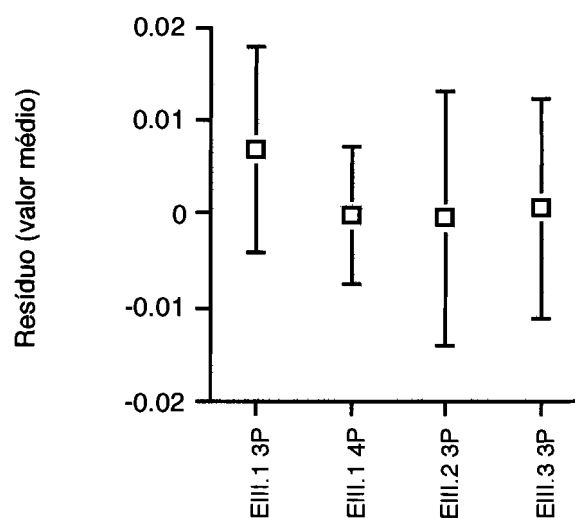


Figura 7.35- Valor médio dos resíduos- ensaios a 25-40°C

As estimativas dos parâmetros A_{II} e L_{II} no ensaio EIII.1 variam significativamente com o número de populações considerado (Figura 7.36 e Quadros A.I.40 e A.I.41).

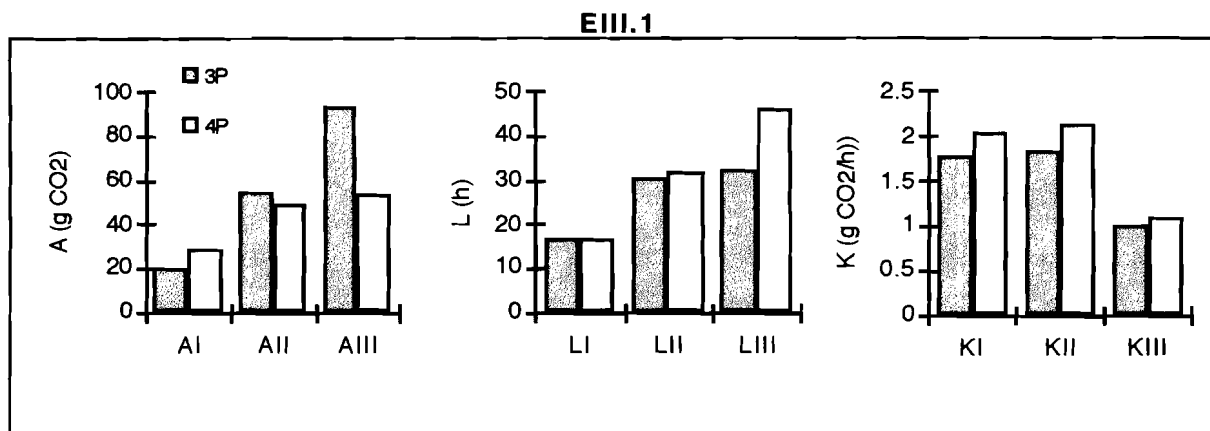


Figura 7.36- Estimativas dos parâmetros (EIII.1)

O teste da razão de verossimilhança aconselha a escolha de quatro populações no ensaio EIII.1 ($F^*=71.3$).

As dimensões relativas das populações nos ajustamentos seleccionados são apresentadas na Figura 7.37. A população I é sobretudo responsável pela subida inicial da temperatura.

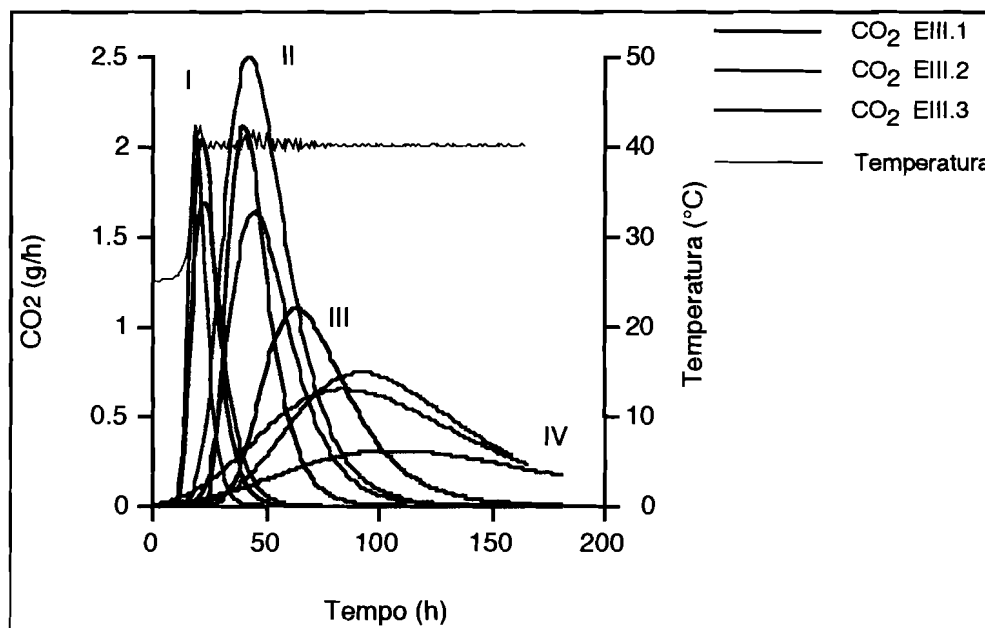


Figura 7.37- Dimensão das populações nos ensaios a 25-40°C (EIII.1 quatro populações, e EIII.2 e EIII.3 três populações)

7.3.4.4 Síntese

Nos ensaios realizados confrontaram-se as hipóteses com três e quatro populações. Para ensaios com a duração de uma semana, verificou-se que é necessário considerar três populações para explicar a evolução da taxa de produção de CO_2 a 25°C e quatro populações, para os ensaios a 40°C e a 25-40°C.

Nos ensaios a 25°C, 40 e 25-40°C, observa-se um decréscimo inicial acentuado na evolução da taxa de produção de CO_2 , embora a 40°C, possa ser incipiente (Figuras 5.6 e 5.7 e 7.25, 7.31 e 7.37). Nos ensaios preliminares E.A e E.B, acima de 40°C, não se verifica esta quebra (Figuras 5.7 e 7.31).

O primeiro máximo de CO_2 resulta essencialmente do desenvolvimento da população I, que corresponde, em todos os ensaios, a bactérias que crescem a 25°C, têm um óptimo entre 25 e 40°C, e o seu crescimento é inibido a 40°C (Figura 7.38).

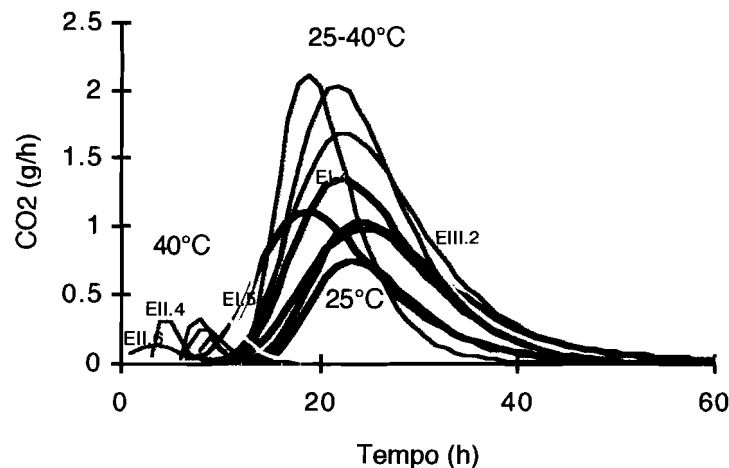


Figura 7.38- População I- Evolução da taxa de produção de CO_2 em diferentes condições de temperatura

A taxa máxima de produção de CO_2 da população I, a 25°C varia entre 0.7 e 1.3g/h, é próxima de 2g/h nos ensaios a 25-40°C e é inferior a 0.5g/h nos ensaios a 40°C (Figura 7.39). A fase de latência dura cerca de 18 horas a 25°C, 16 horas a 25-40°C e é inferior a 10 horas a 40°C. A correspondente produção máxima de CO_2 é, respectivamente, inferior a 20g, cerca de 30g e insignificante.

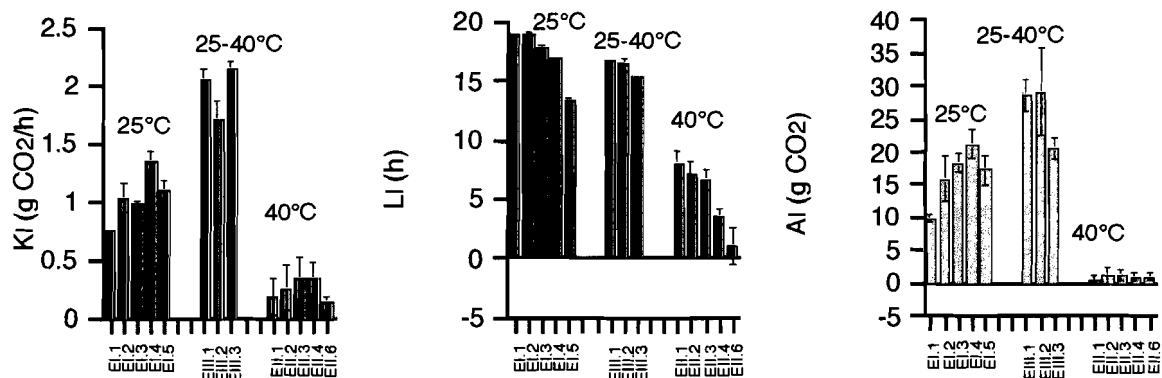


Figura 7.39- População I- Taxa máxima de produção de CO₂, fase de latência e produção máxima de CO₂ em diferentes condições de temperatura

O segundo máximo de CO₂ resulta essencialmente do desenvolvimento da população II, que é caracterizada por bactérias e bolores da ordem Mucorales, tanto a 25°C como a 40°C, se bem que a esta temperatura se observasse muito micélio não germinado. O funcionamento a 40°C favorece o desenvolvimento da população II e o aumento inicial da temperatura nos ensaios 25-40°C afecta positivamente a actividade desta população (Figura 7.40).

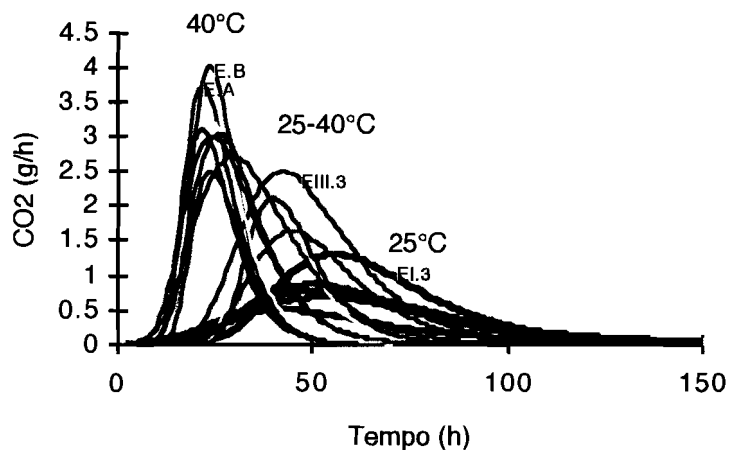


Figura 7.40- População II- Evolução da taxa de produção de CO₂ em diferentes condições de temperatura

A taxa máxima de produção de CO₂ da população II é inferior a 1g/h a 25°C, é da ordem de 2g/h nos ensaios a 25-40°C e 3g/h a 40°C (Figura 7.41). A duração da fase de latência é da ordem de 30 horas tanto a 25°C como a 25-40°C e inferior a 20 horas a 40°C. A produção máxima de CO₂ é da ordem de 45g a 25°C, cerca de 60g a 25-40°C e varia entre 45 e 85g a 40°C.

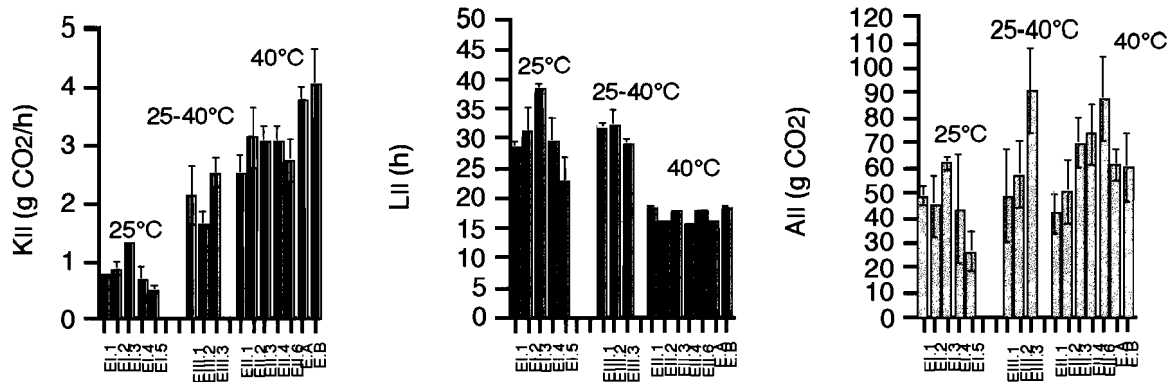


Figura 7.41 População II- Taxa máxima de produção de CO₂, fase de latência e produção máxima de CO₂ em diferentes condições de temperatura

A população III, para além das bactérias, é constituída por *Penicillium* sp. a 25°C e *Aspergillus* sp. a 40°C. O funcionamento a 40°C bem como o aumento inicial da temperatura nos ensaios 25-40°C favorecem o desenvolvimento da população III (Figura 7.42).

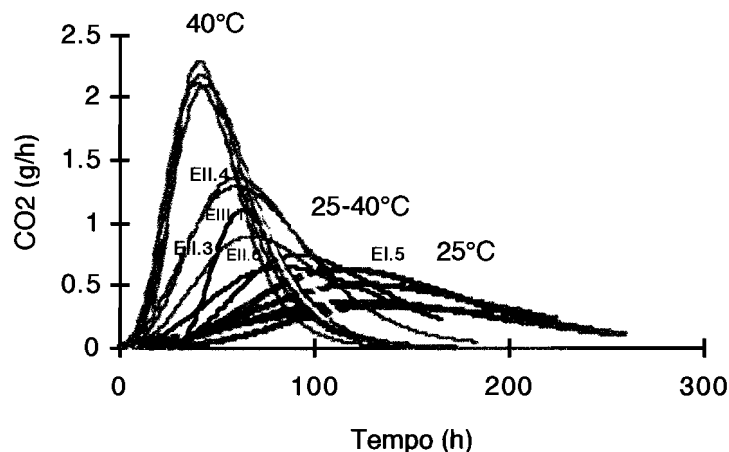


Figura 7.42- População III- Evolução da taxa de produção de CO₂ em diferentes condições de temperatura

A taxa máxima de produção de CO₂ é igual ou inferior a 0.6g/h a 25°C, varia entre 0.7 e 1.4g/h a 25-40°C e 0.9 e 2.3g/h a 40°C. A duração da fase de latência é superior a 60 horas a 25°C, 40 horas a 25-40°C e pouco mais de 27 horas a 40°C. A produção máxima de CO₂ varia entre 50 e 90g a 25°C, é da ordem de 70g a 25-40°C e 100g a 40°C (Figura 7.43).

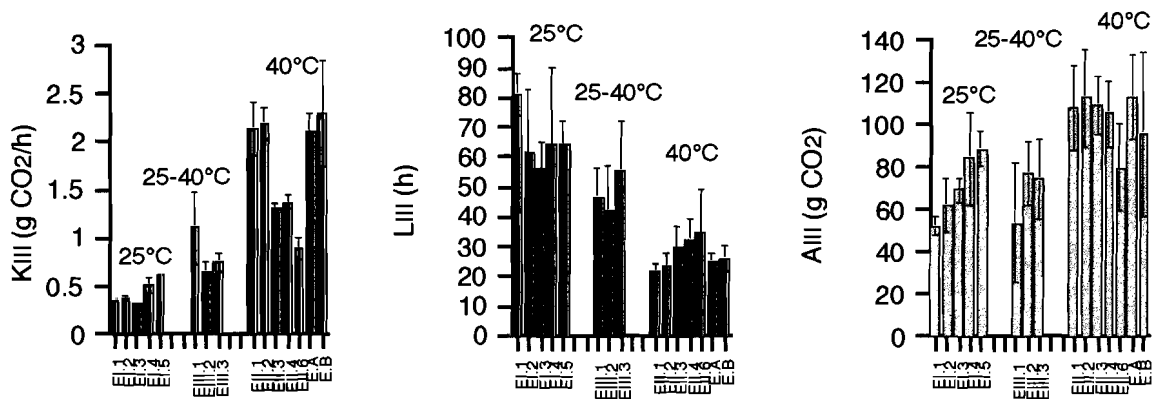


Figura 7.43- População III- Taxa máxima de produção de CO₂, fase de latência e produção máxima de CO₂ em diferentes condições de temperatura

A população IV a 25°C, é constituída por bactérias e por bolores, sendo estes pertencentes ao género *Aspergillus*. O ensaio Ell.6 não foi suficientemente prolongado para permitir a identificação desta população a 40°C. As características da população IV não se distinguem a 25-40°C e 40°C (Figuras 7.44 e 7.45). A 25°C, tanto a taxa máxima de produção de CO₂ como a produção máxima de CO₂ são insignificantes e a duração da fase de latência superior a 200 horas.

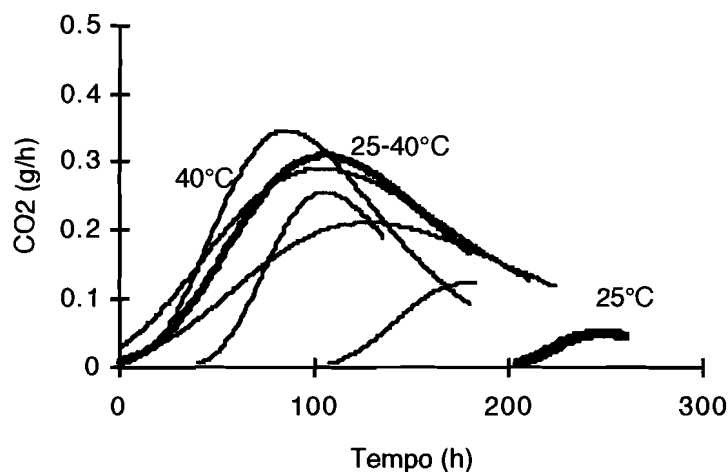


Figura 7.44- População IV- Evolução da taxa de produção de CO₂ em diferentes condições de temperatura

O funcionamento a 40°C, comparativamente ao funcionamento a 25°C, favorece a taxa máxima de produção de CO₂, a produção máxima de CO₂ e reduz a duração da fase de latência das populações II, III e IV. Temperaturas acima de 40°C (ensaio E.A e E.B) favorecem sobretudo a taxa máxima de produção de CO₂ da população II.

A variação gradual da temperatura no início dos ensaios 25-40°C, para além da população I, afecta a taxa máxima de produção de CO₂ das populações II e III, e a duração da fase de latência da população III. Nestes ensaios, a população II produz uma quantidade de CO₂ equivalente à mesma população a 40°C e a produção da população III é semelhante à mesma população a 25°C.

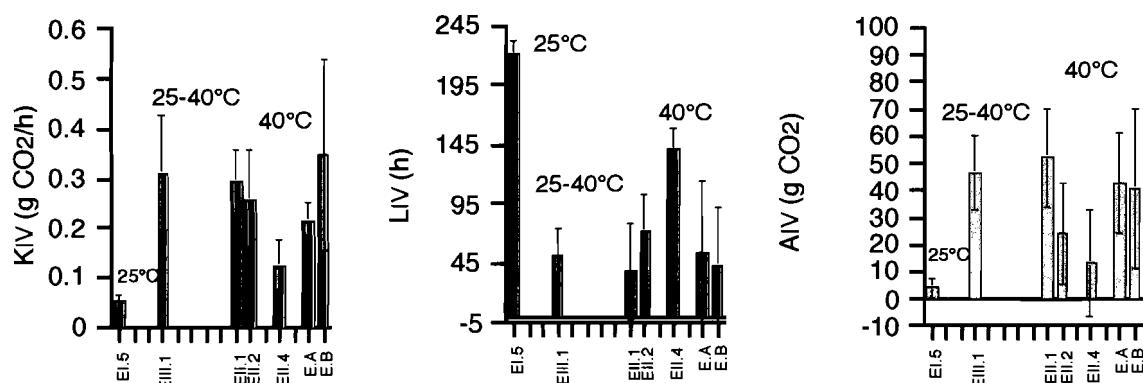


Figura 7.45 População IV- Taxa máxima de produção de CO₂, fase de latência e produção máxima de CO₂ em diferentes condições de temperatura

A variação na produção máxima de CO₂ das populações I e II a 25°C, 40°C e 25-40°C, não permite considerar qualquer relação com a temperatura (Figura 7.46).

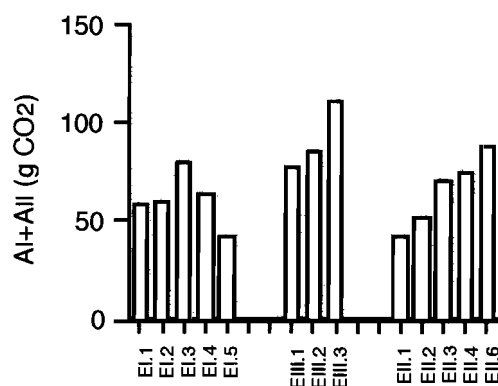


Figura 7.46- Produção máxima de CO₂- populações I e II

7.4 Discussão

No início do capítulo 7 (§7.3.1), evidenciou-se a desadequação da utilização dos resultados de contagens de colónias de bactérias e fungos em placas na modelação cinética do processo de compostagem e optou-se pela utilização da taxa de produção de CO₂, complementada com a alteração do aspecto macroscópico dos reactores e a modificação dos bolores activos, identificados através da observação imediata e à lupa do substrato.

Acrescente-se que alguns dos microrganismos isolados em placas durante o ensaio EI.5 (*Fusarium* sp. e *Zygorhynchus* sp.) não foram observados no substrato em compostagem (Quadro 5.9). E o contrário também ocorreu: certos bolores, identificados directamente no substrato durante o ensaio (*Aspergillus* sp.), não cresceram nas placas. Também se verificou que bolores identificados após plaqueamento do substrato inicial, a 25°C, não foram observados no substrato em compostagem a essa temperatura (*Syncephalastrum* sp. e *Geotrichum* sp.), e, apesar de nos plaqueamentos para caracterização da flora inicial a 40°C não terem crescido bolores, no ensaio EII.6 (Quadro 5.9) foram identificados diversos, por observação directa, à lupa. Conclui-se que a discrepância entre a informação fornecida pelas placas e o que se passa realmente no reactor não é apenas quantitativa, mas também qualitativa e temporal.

Os bolores que se desenvolveram nos ensaios realizados e foram identificados através da observação imediata do substrato à lupa, Mucorales (*Mucor* sp., *Rhizopus* sp.), *Penicillium* sp. e *Aspergillus* sp., encontram-se em alimentos em deterioração (Moreau, 1974; Magnuson *et al.*, 1990) e fazem parte da flora da casca de arroz (United Nations Industrial Development Organization, 1985). Na armazenagem de cereais, nomeadamente de arroz, são descritas sucessões de microrganismos que envolvem Mucorales, *Aspergillus* sp. e *Penicillium* sp. (Schroeder e Calderwood, 1972; Bars e Escoula, 1973; Pelhate, 1982a,b) e a sequência depende sobretudo da humidade, arejamento e temperatura (Pelhate, 1982a,b). As condições de humidade na armazenagem são distintas do processo de compostagem: a humidade relativa e a humidade dos cereais podem variar, respectivamente, no intervalo 65-85% e 8.5-18.5%, conforme os cereais. A humidade relativa mínima, para temperaturas entre 26 e 30°C, para o crescimento de *Aspergillus glaucus* é de 73%, de *Aspergillus flavus*, 85%, de *Penicillium* sp., 80-90% e de leveduras, 95% (Christensen e Kaufmann, 1974 citados por Pelhate, 1982a). Os bolores da ordem Mucorales são neste aspecto mais exigentes que *Penicillium* sp. (Schroeder e Calderwood, 1972) e são poucas as bactérias que se

desenvolvem abaixo de 90%, preferindo humidade próxima de 100% (Finstein e Morris, 1975).

O funcionamento em condições de temperatura mais elevadas, mesmo que temporariamente, traduz-se no aumento relativo da taxa máxima de produção de CO₂ e reduz a duração da fase de latência. A população I tem um comportamento de excepção relativamente ao anterior, pois tem dificuldade em se desenvolver a 40°C (taxa máxima de produção de CO₂ reduzida). A variação da temperatura nos ensaios 25-40°C não afecta a população IV, por acontecer apenas na sua fase inicial.

No intervalo de temperaturas utilizado, embora só no caso da população I se tenha verificado o aumento da actividade até uma temperatura óptima seguido de decréscimo, supõe-se que as outras populações tenham um comportamento idêntico que pode ser descrito por uma equação do tipo de Arrhenius, e naturalmente com óptimos distintos (Bailey e Ollis, 1986; McGill *et al.*, 1981 citado por Moorhead e Reynolds, 1992; Nout, 1992). Kaiser (1996), apesar de usar taxas específicas máximas de crescimento distintas para cada tipo de microrganismo, simplifica usando a mesma dependência com a temperatura que coincide com o comportamento global do processo de compostagem.

O facto de as bactérias serem as primeiras a colonizar o substrato, desde que as condições não sejam extremas, e só posteriormente se verificar o desenvolvimento de bolores, é referido por vários autores, nomeadamente Kubocz e Gruneklee (1995). Griffin (1985), citado por Miller (1989), refere que, em geral, os fungos têm taxas específicas máximas de crescimento e taxas de respiração uma ordem de grandeza abaixo das bactérias. De qualquer modo, Pitter and Chudoba (1990), ao reunirem informação sobre taxas específicas máximas de crescimento de diversos microrganismos, alertam para o facto destas taxas serem habitualmente determinadas em culturas puras e portanto deverem ser usadas com precaução no caso de culturas mistas. Waksman *et al.* (1939b) verificaram, em ensaios de compostagem a 28°C, que as bactérias predominam e os fungos começam a desenvolver-se mais tarde.

O comportamento da população I relativamente à temperatura faz supôr tratar-se das mesmas espécies de bactérias (Figura 7.38). A população I não é limitada pelo substrato a 25°C ou a 40°C, porque a produção máxima de CO₂ é maior nos ensaios a temperatura variável (Figura 7.39). Tendo dificuldade em sobreviver a 40°C, não se mantem por mais tempo nos ensaios a 25-40°C porque a temperatura, a um dado nível, torna-se desfavorável: a taxa de produção de CO₂

decrece a cerca de 37°C (Figura 5.2). Mas, mesmo a 25°C, a população I é substituída pela população II.

No modelo, o acentuado decréscimo inicial na evolução da taxa de produção de CO₂ corresponde à substituição da população I pela população II. O facto da população I não se desenvolver acima de 40°C justifica, que nos ensaios E.A e E.B, não se observe o decréscimo inicial na evolução da taxa de produção de CO₂.

O facto da população II ser caracterizada por Mucorales está de acordo com a observação de Hesseltine e Ellis (1973), que referem que a elevada taxa de crescimento destes bolores justifica que sejam os primeiros a instalar-se na matéria vegetal em degradação. Moreau (1974) também mediu a velocidade de crescimento de diversos bolores cultivados em malte (2%), a 22°C e 32°C, e verificou que *Mucor racemosus* e seis espécies do género *Penicillium*, cresciam a 22°C, respectivamente, 13.5mm/d e entre 0.7-2.8mm/d e não cresciam a 32°C, enquanto que *Aspergillus flavus*, *Aspergillus fumigatus* e *Aspergillus niger* cresciam mais lentamente a 22°C (respectivamente 5.2, 4.9, 2.0mm/d) do que a 32°C (respectivamente 7.8, 11.6 e 4.6mm/d).

A população II mostrou estar melhor adaptada a 40°C do que 25°C, de acordo com a taxa máxima de produção de CO₂ e a duração da fase de latência, tendo desenvolvido micélio branco a 40°C e rapidamente esporulado a 25°C (Figuras 7.40 e 7.41). Apesar de bolores da ordem Mucorales fazerem parte da população II, as observações vão no sentido das espécies dominantes se terem alterado com a temperatura: a 25°C compreendia *Mucor racemosus*, *Mucor hiemalis* e *Thamnidium* sp. enquanto que a 40°C estariam presentes *Rhizopus* sp. e *Syncephalastrum* sp. (Quadro 5.9).

Segundo Onions *et al.* (1981), *Mucor* sp., *Rhizopus* sp., *Thamnidium* sp. e *Syncephalastrum* sp., apesar de pertencerem a famílias diferentes (os dois primeiros, à família Mucoraceae, e os outros dois, respectivamente, às famílias Thamnidiaceae e Syncephalastraceae), fazem parte da mesma ordem (Mucorales), formam micélio branco nos estádios iniciais de crescimento, que se torna cinzento ou castanho com a produção de estruturas de frutificação, têm taxa de crescimento e aparência característica e mesmo quando não frutificam, o aspecto não os coloca no grupo (subdivisão) dos Fungos Imperfeitos, a que pertencem nomeadamente *Aspergillus* sp. e *Penicillium* sp.. Contudo, *Mucor racemosus* não cresce a 37°C, *Mucor hiemalis* não cresce a 30°C, e *Rhizopus oryzae* cresce a 37-40°C. Domsch *et al.* (1980), referem que muitas espécies do

género *Rhizopus* crescem a temperaturas elevadas, nomeadamente com temperaturas máximas acima de 40°C.

Acresce que, de acordo com Onions *et al.* (1981), *Thamnidium elegans* e *Syncephalastrum racemosus* são bolores comuns, o primeiro assumindo aspectos distintos consoante a temperatura e podendo surgir em carne armazenada no frio, enquanto que o segundo prefere temperaturas tropicais e sub-tropicais.

A forma exuberante como o micélio branco se desenvolveu a 40°C, torna pouco provável que se tratasse de *Mucor racemosus* e *Mucor hiemalis*. Antes de o considerar como *Mycelia sterilia* (Onions *et al.* 1981), solução de recurso na impossibilidade de provocar a germinação do micélio, cuja presença na compostagem de palha de trigo foi referida por Chang e Hudson (1967), deverá considerar-se a hipótese de se tratar de *Mucor pusillus*, que cresce entre 20 e 50°C, com o óptimo a 40°C (Moreau, 1974).

A substituição da população II pela população III não origina um decréscimo acentuado na evolução da taxa de produção de CO₂ (Figuras 5.6 e 5.7 e 7.25, 7.31 e 7.37). A produção máxima de CO₂ das populações I e II não é constante nos ensaios realizados (Figura 7.46), mas a população III é favorecida a 40°C (Figura 7.42) e é a sua actividade que marca a diferença entre a produção máxima de CO₂ a 25°C e a 40°C (Figura 7.43).

A inclusão de *Penicillium* sp. na população III a 25°C, e de *Aspergillus* sp. (*Aspergillus fumigatus*) a 40°C, bem como o facto da população IV a 25°C incluir *Aspergillus* sp. (*Aspergillus niger*), está de acordo com os resultados apresentados anteriormente sobre crescimento de microrganismos em malte. Acrescente-se que *Aspergillus fumigatus* cresce entre 12-52°C, com o óptimo a 37°C e entre 14 espécies do género *Penicillium* todas crescem entre 12 e 27°C, algumas tendo o mínimo abaixo de 0°C, o máximo aproximadamente a 35°C e o óptimo entre 25-27°C (Moreau, 1974). Onions *et al.* (1981) referem que as espécies do género *Penicillium* têm temperaturas óptimas entre 20-25°C, enquanto que as espécies do género *Aspergillus* crescem melhor a 30°C.

Supõe-se, em resumo, que a alteração da taxa de produção de CO₂ corresponde à modificação das populações de microrganismos activos que, quando avaliados em função dos bolores, se pode traduzir do seguinte modo:

- Sucessão a 25°C-

1º máximo: bactérias----->2º máximo: bactérias + Mucorales (*Mucor* sp., *Thamnidium* sp.)

----->3º máximo: bactérias + *Penicillium* sp.----->4º máximo: bactérias + *Aspergillus* sp.

- Sucessão a 40°C-

1º máximo: bactérias----->2º máximo: bactérias + micélio vegetativo + Mucorales (*Rhizopus* sp., *Syncephalastrum* sp.)----->3º máximo: bactérias + *Aspergillus* sp.

A sucessão a 25-40°C deverá ser semelhante à prevista para 40°C só que o primeiro máximo correspondente ao desenvolvimento de bactérias aparece aumentado. Verificou-se que o substrato mantinha por mais tempo o aspecto inalterado.

A sobreposição parcial de populações justifica que se observem, na mesma amostra, microrganismos de diferentes populações em fase diferente de desenvolvimento, como se verificou no caso de Mucorales e *Penicillium* sp., no ensaio EI.5.

Aos ensaios de compostagem realizados, associou-se um número variável de populações, sendo necessário dispor de uma metodologia para optar entre três ou quatro populações. A metodologia incluía essencialmente a análise gráfica dos ajustamentos e a análise estatística.

A análise gráfica compreendeu (i) a verificação da melhoria do ajustamento entre os valores de CO₂ observados e estimados devida ao acréscimo do número de populações ou a impossibilidade do desenvolvimento em simultâneo de duas populações e (ii) a verificação do momento relativo de aparecimento das populações, sobretudo da população I, relacionado com as observações de alteração do aspecto macroscópico do substrato em compostagem.

Através da análise estatística determinou-se os intervalos de confiança assintóticos para os parâmetros característicos das populações, calculou-se r^2 , analisou-se o comportamento dos resíduos e a variação das estimativas dos parâmetros, e usou-se o teste da razão de verosimilhança para comparar as soluções. A solução

escolhida foi também comparada com as outras soluções obtidas em ensaios nas mesmas condições e a hipótese da sucessão de populações foi verificada através da observação dos bolores activos.

Verificou-se que na escolha da solução foi preponderante a análise gráfica do ajustamento associado à impossibilidade do desenvolvimento em simultâneo de duas populações, dos intervalos de confiança assintóticos dos parâmetros (populações II e III), e do resultado do teste da razão de verosimilhança.

O número de populações necessário para explicar a evolução da taxa de produção de CO₂ depende da duração dos ensaios, conforme se constata através dos ensaios EI.1 e EI.2 prolongados até 450 horas, e da temperatura. A aceleração do processo de compostagem a 40°C e 25-40°C justifica a necessidade da quarta população, em ensaios de uma semana. A variação relativa da duração dos ensaios justifica o número de populações seleccionado nos ensaios EI.5, EII.3, EII.6, EIII.2 e EIII.3 (Figuras 7.25, 7.31, 7.37).

Verificou-se ainda que a duração dos ensaios influencia as estimativas dos parâmetros das populações. O prolongamento dos ensaios a 25°C mostrou que as características das populações I e II não variam em ensaios de uma semana. Por isso, sempre que se discutiu a hipótese de três ou quatro populações, verificou-se a influência da opção na estimativa das populações (Figuras 7.24, 7.30, 7.36).

No modelo desenvolvido verificou-se que os pressupostos relativos ao erro nem sempre eram satisfeitos. O incremento do número de populações, três ou quatro populações em ensaios de uma semana, reduz o resíduo na fase final dos ensaios a 40°C e 25-40°C, mas não modifica a aleatoriedade do seu comportamento (excepção: EIII.1). São poucas as situações de distribuição aleatória (ensaios EI.2-180h, EII.3). Uma análise de pormenor do comportamento do resíduo mostra que esta distribuição pode ser considerada aleatória num período inicial (excepções: ensaios EI.5 e E.B): o resíduo toma valores positivos e negativos em torno do eixo do xx, a partir de 50-100 horas, consoante a temperatura do ensaio.

Independentemente de serem três ou quatro populações, a distribuição de frequências do resíduo é normal e a média zero (excepções: E.A, E.B).

O pressuposto de variância constante só foi verificado no ensaio EIII.1 quatro populações. O incremento do número de populações alterou o comportamento da variância no ensaio EIII.1 e nos ensaios EII.1 e EII.5, onde aumenta com o valor de CO₂ estimado. Nos outros ensaios, o comportamento da variância denota o

carácter não aleatório da distribuição do resíduo (EI.1, EI.5, EII.4, EII.6, E.A e E.B) ou aumenta com o valor de CO₂ estimado (EI.2, EI.3, EI.4, EII.2, EII.3, EIII.2 e EIII.3).

Utilizando r^2 como uma medida absoluta do ajustamento, três ou quatro populações, conduziu sempre a valores superiores a 0.99 (excepção: EII.1 três populações). O teste da razão de verossimilhança usado para comparar soluções, sugeriu sistematicamente a escolha da situação com mais populações (excepção: ensaio EI.2 180h). Mas o facto do acréscimo de uma população ter de se traduzir por uma melhoria no ajustamento entre os valores de CO₂ observados e estimados ou, de outro modo, desprezava-se a situação em que as populações se desenvolviam totalmente em simultâneo, nos ensaios EI.1 (213h e 450h), EI.3 e EI.4 (25°C) a solução indicada pelo teste da razão de verossimilhança não foi a seleccionada.

No ensaio EI.2 180h a situação foi discordante do habitual. A solução finalmente seleccionada necessitou da análise do ensaio considerando maior duração. O teste da razão de verossimilhança apontava a hipótese com três populações como a melhor e escolhemos a hipótese com quatro populações. Posteriormente, o prolongamento do ensaio até às 450h mostrou que a melhor solução até às 180h era a de três populações, o que estava de acordo com a duração relativa do ensaio. Na realidade, o valor da estatística do teste era próximo do valor crítico, pelo que estatisticamente a selecção da solução não era clara, e, embora a melhoria no ajustamento com a quarta população fosse imperceptível, não havia sobreposição de populações.

No conjunto dos ensaios realizados, apenas num caso (ensaio EII.5) foi necessária mais uma população para melhorar de forma evidente o ajustamento e os algoritmos usados não foram capazes de encontrar uma solução a que se pudesse atribuir significado biológico. Nas outras situações, quando o acréscimo de uma população (população IV) não trazia benefícios evidentes ao ajustamento, os algoritmos comportaram-se (com excepção dos ensaios EI.2 180h e EII.6 quatro populações) de dois modos: ou essa população aparecia colocada no meio das outras, desenvolvendo-se em simultâneo e podendo assumir valores negativos (como, aliás, as restantes), o que significa que matematicamente podia não existir e biologicamente foi considerada como fazendo parte de outra população (ensaios EI.4 e EIII.2 quatro populações), ou a população III era subdividida em duas, que podiam assumir valores negativos e por isso esta solução não foi considerada (ensaios EII.3 e EIII.3 quatro populações). Acrescente-se que, nos ensaios a 40°C, as observações microbiológicas foram feitas num ensaio curto (ensaio EII.6), em que *Aspergillus* sp. faziam parte da população III e a quarta população não foi

identificada. É natural que, de acordo com os ensaios a 25°C, a população IV corresponda a outros bolores, com desenvolvimento discreto, cuja contribuição para a taxa de produção de CO₂ não seja tão importante que corresponda à subdivisão da população III em duas populações com peso idêntico.

Acrescente-se ainda que, embora no ensaio Ell.2, a opção tenha sido por quatro populações, ficou por explicar o comportamento dos algoritmos na hipótese de três populações: a solução gráfica e a estimativa de "A_i" são incompatíveis.

A dificuldade na obtenção de convergência verificada em algumas situações, bem como a necessidade de confirmação da solução, foram ultrapassadas pela utilização conjunta dos algoritmos Quasi-Newton e Levenberg-Marquardt e pela modificação dos valores iniciais atribuídos aos parâmetros (excepção: El.2- 450h cinco populações).

Não foi critério de exclusão, quando as populações I ou IV melhoravam o ajustamento, verificar-se que os respectivos intervalos de confiança assintóticos das estimativas dos parâmetros continham o zero. Na primeira situação, o facto da população I a 40°C ter um desenvolvimento incipiente, relativamente às outras populações, com a duração de poucas horas em ensaios de uma semana, justifica a dificuldade matemática, mas também mostra a robustez da ferramenta (ensaios Ell.1, Ell.2 e Ell.6). A população IV, embora melhorasse o ajustamento na fase final, os limites inferiores dos intervalos de confiança assintóticos de "L" ou de "A" eram negativos quando esta população surgia, respectivamente, lentamente no início dos ensaios ou no fim (ensaios Ell.1, Ell.4, E.A e E.B). Os ensaios não foram suficientemente prolongados para que a estimação da população IV pudesse ter sido feita com dados suficientes, o que justifica a variação das suas características apresentadas nas Figuras 7.44 e 7.45.

8. DEGRADAÇÃO DO SUBSTRATO

8.1 Objectivos

Este capítulo tem os seguintes objectivos:

- analisar a degradação do substrato, em regime de temperatura fixa (25 e 40°C) e temperatura variável (25-40°C), avaliada globalmente através da produção de CO₂, redução de peso seco, sólidos voláteis, amido, hemicelulose, celulose e lenhina,
- relacionar a produção acumulada de CO₂ associada a cada população com a redução de amido, hemicelulose, celulose e lenhina, de modo a fundamentar a hipótese da sucessão.

8.2 Análise dos resultados e discussão

A composição esperada para o substrato (50% casca, 34% farinha escura, 16% farinha branca) e a média das composições no início dos ensaios, determinadas com base nos dados, respectivamente, dos Quadros 5.1 e 5.3, são muito semelhantes, excepto no caso da hemicelulose (Figura 8.1). Dado que a análise directa do substrato permitiu identificar 100% da sua composição, a diferença na concentração da hemicelulose resulta da sua determinação na casca e farinha escura: a percentagem de não identificados na composição esperada diz respeito à casca e à farinha escura, respectivamente 14.7% e 17.6%, dado conhecer-se a composição total da farinha branca (Quadro 5.1). O substrato usado nos ensaios de compostagem é sobretudo constituído por hemicelulose (30%), celulose (20%), amido (20%) e, em menor percentagem, por lenhina, proteínas e uma fracção mineral (respectivamente 9, 7 e 13%).

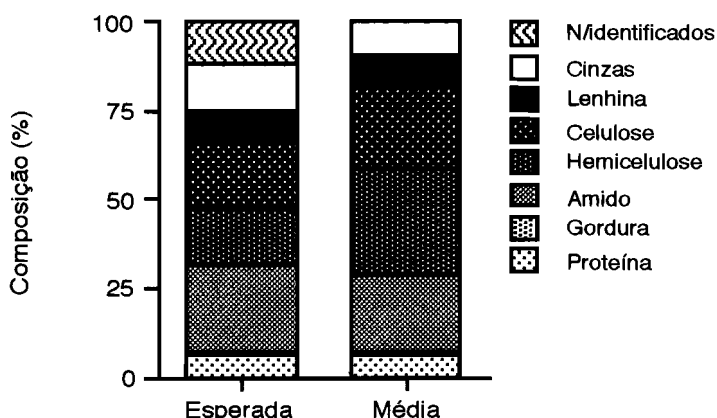
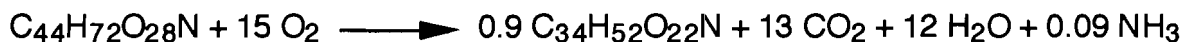


Figura 8.1- Composição do substrato^(*)

^(*) Não foram determinadas as concentrações em matéria gorda e proteína bruta no substrato depois de preparado tendo-se admitido iguais à concentração esperada

Tendo-se acompanhado a evolução do substrato com a análise elementar da sua composição (Quadro 5.2), verificou-se que o carbono produzido sob a forma de CO₂ era praticamente igual ao carbono degradado (Quadro A.II.1). A estequiometria da reacção é a seguinte:



Produz-se 1.8gCO₂/g de substrato degradado e consome-se 1.6g O₂. A necessidade estequiométrica de oxigénio, segundo Haug (1993), varia, consoante a presença relativa de oxigénio e da natureza dos produtos finais, entre 1g/g de substrato degradado em compostos como o amido e a celulose, e 4g/g em hidrocarbonetos saturados, sendo 2 o valor típico de substratos complexos, como lamas de ETAR, que incluem misturas de gorduras, glúcidos e proteínas. Do mesmo modo, o coeficiente de respiração, RQ (mole de CO₂ produzido/mole de O₂ consumido), na oxidação a CO₂ e água, é igual a 1 quando se trata de amido, 0.81 de proteínas, e 0.71 de gorduras (Gray *et al.*, 1971). Keneer *et al.* (1993), reuniram valores de RQ obtidos por outros autores na compostagem de diferentes substratos, que variam entre 0.76 e 1.02. No presente trabalho, RQ é igual a 0.87.

O ajuste do modelo de Gompertz aos resultados de produção acumulada de CO₂ (Figura 5.8) permite estimar que, após 168 horas, serão libertadas 114g e 116g de CO₂, respectivamente, nos ensaios EI.3 e EI.4 (25°C), 177g de CO₂ no ensaio EII.4 (40°C) e, 160g e 169g de CO₂, respectivamente, nos ensaios EIII.1 e EIII.3 (25-40°C) (Figura 8.2). Os ensaios a 40°C mostraram ser mais favoráveis à produção de CO₂. No intervalo de temperaturas ensaiadas, o acréscimo na produção acumulada de CO₂ era esperado. Miller (1992) resume os resultados de diversos autores, referindo que a actividade é favorecida acima de 20°C, tem um óptimo próximo de 50°C, decresce acima dos 60°C e cessa a 82°C.

Nos ensaios 25-40°C, o aumento progressivo da temperatura de 25 até 40°C é responsável pela diferença na produção acumulada de CO₂, relativamente aos ensaios a 40°C (Figura 8.3). Nos ensaios 25-40°C favorece-se o desenvolvimento do primeiro máximo, enquanto que nos ensaios a 40°C é o segundo que é incrementado, seguidos de um declínio gradual coincidente. Bach *et al.* (1985), na compostagem de lamas a 60°C, em condições isotérmicas e adiabáticas, chegaram às mesmas conclusões: temperaturas superiores aceleram o processo de compostagem e a diferença é reduzida com o tempo porque o substrato degradável torna-se limitante na fase final dos ensaios. Também a fase de arranque é reduzida quando se inicia directamente a 40°C. Schulze (1962) verificou que, se o processo de compostagem fosse operado continuamente em

fase termofílica, a demora no arranque pode ser eliminada e obterem-se maiores conversões porque a chegada de substrato é permanente.

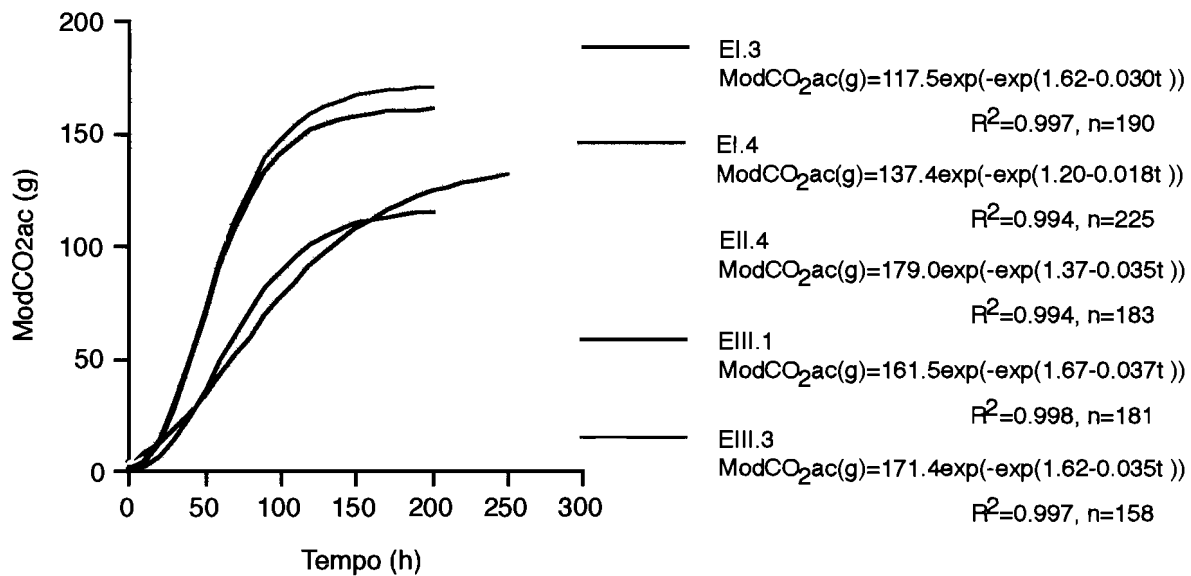


Figura 8.2- Produção acumulada de CO₂ estimada pelo modelo de Gompertz

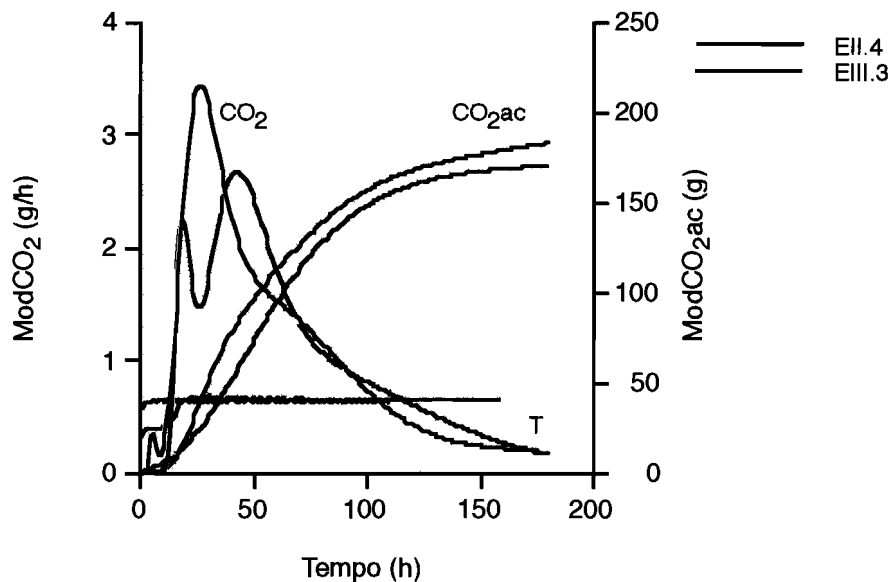


Figura 8.3- Efeito da variação inicial da temperatura na produção de CO₂

Os ensaios EI.1 e EI.2, 450 horas, permitiram verificar que, mesmo que se prolonguem os ensaios a 25°C, não se atinge a produção de CO₂ dos ensaios a 40°C (ensaio EI.1 $\text{ModCO}_2\text{ac(g)} = 119.2 \exp(-\exp(1.07 - 0.013t))$, $r^2 = 0.990$, $n = 450$; ensaio EI.2 $\text{ModCO}_2\text{ac(g)} = 130.5 \exp(-\exp(1.02 - 0.014t))$, $r^2 = 0.986$, $n = 450$). Bach *et al.* (1984), apesar de não discutirem este aspecto explicitamente, em ensaios isotérmicos e independentemente da sua duração, obtiveram aproximadamente

35% de redução de carbono a 37°C, 54% a 46°C e pouco mais de 60% tanto a 56 como a 62°C.

A produção acumulada de CO₂ está linearmente relacionada com a redução de peso seco: r^2 foi sempre igual ou superior a 0.99 (Quadro A.II.2 e Figura 8.4). A consideração de uma relação única para o conjunto dos ensaios reduz r^2 para 0.980. Assim, enquanto que a redução de peso seco nos ensaios a 25°C, após 168 horas, é em média igual a 68g, nos ensaios a 40°C essa redução é igual a 102g e nos ensaios 25-40°C, a 95g. De outro modo, esperam-se reduções de peso seco da ordem de 20, 30 e 28% respectivamente, nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C ($RPS(\%) = 0.16 \text{ModCO}_2 \text{ac} + 1.32$, $r^2 = 0.981$, $n = 29$).

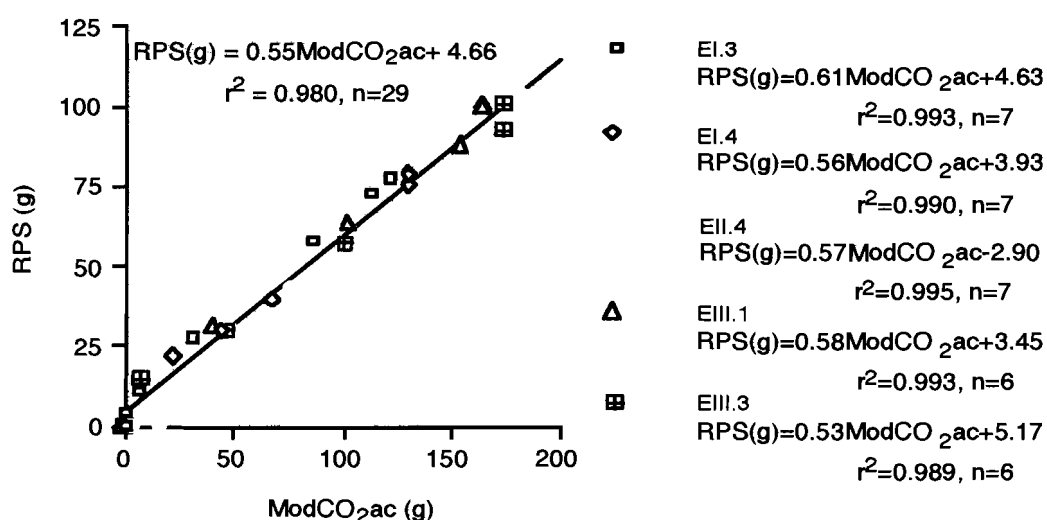


Figura 8.4- Redução de substrato

Bach *et al.* (1984), Bach *et al.* (1985), Nakasaki *et al.* (1985c), Kubota *et al.* (1986), Nakasaki e Akiyama (1988), Kubota e Nakasaki (1991) usaram, para converter os resultados de CO₂, uma relação linear entre a produção acumulada de CO₂ e a redução de sólidos voláteis.

Uma análise detalhada da produção acumulada de CO₂, em momentos intermédios, e da redução de peso seco (Quadro A.II.2), mostra que a relação entre estas duas medidas da degradação do substrato a 25, 40 e 25-40°C, não foi constante. Do mesmo modo, Atkinson *et al.* (1996b) interpretaram a variação do coeficiente de respiração (RQ) durante o processo de compostagem pela modificação da natureza do substrato. A modificação da natureza do substrato que é degradado justificou a opção tomada inicialmente de não dividir a produção de CO₂ pela quantidade de substrato. Bagstam e Swensson (1976) e Bagstam (1977; 1978), em estudos da influência de diversos parâmetros (azoto, pH) na

compostagem de um substrato específico (casca de árvore do género *Picea* sp.), e na sucessão de populações, procederam exactamente da mesma forma: a taxa de produção de CO₂ é apresentada em unidades MT⁻¹, mais precisamente em gh⁻¹.

A utilização de dados de peso seco ou sólidos voláteis para comparar o processo de compostagem mostrou ser indiferente: a redução de peso seco é igual à redução de sólidos voláteis ($RSV(g)=1.01RPS(g)+0.90$, $r^2=0.998$ para o conjunto dos ensaios, $n=29$). Enquanto o grupo de investigação do Tokyo Institute of Technology usa sistematicamente os sólidos voláteis, Keener *et al.* (1993), utilizaram o peso seco.

O amido é degradado praticamente na totalidade (90-95%), embora a taxa máxima varie de acordo com a temperatura de ensaio (Figura 8.5).

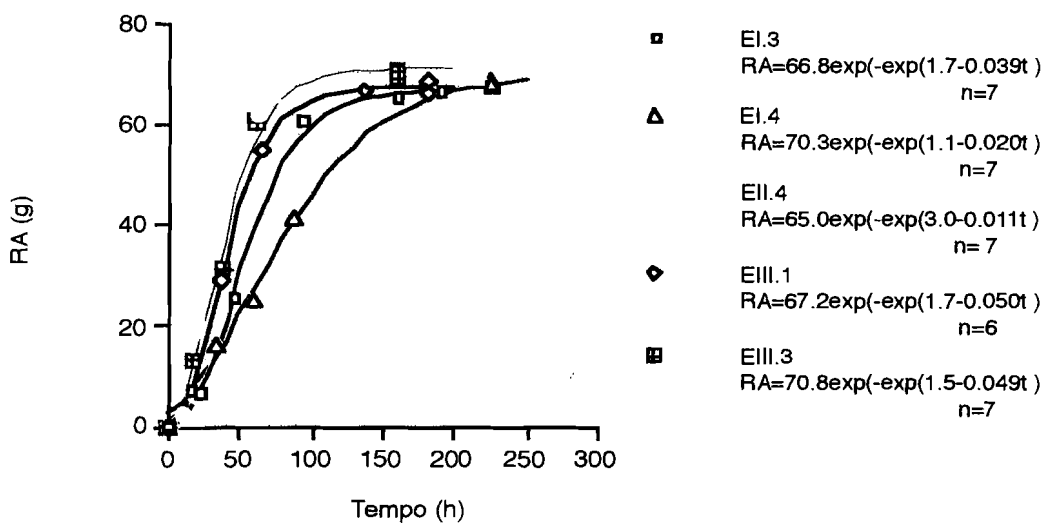


Figura 8.5- Degradação de amido

Os ensaios iniciam-se com a degradação de amido (Figura 8.6). Procurou associar-se a redução de amido com a actividade de cada população (Quadro 8.1).

Quadro 8.1- r^2 na regressão linear $ModRA=a ModCO_2ac+ b$

	ModCO ₂ ac PI+PII+PIII+IV	ModCO ₂ ac PI+PII+PIII	ModCO ₂ ac PI+PII+PIII (até t=t h) (*)	ModCO ₂ ac PI+PII
EI.3		0.973	0.987	0.998
EI.4		0.992	0.996	0.927
EII.4	0.851	0.858	0.972	0.990
EIII.1	0.963	0.991	0.990	0.978
EIII.3		0.952	0.974	0.992

(*) Considerou-se t igual a 150, 70 e 100 horas, respectivamente, nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C

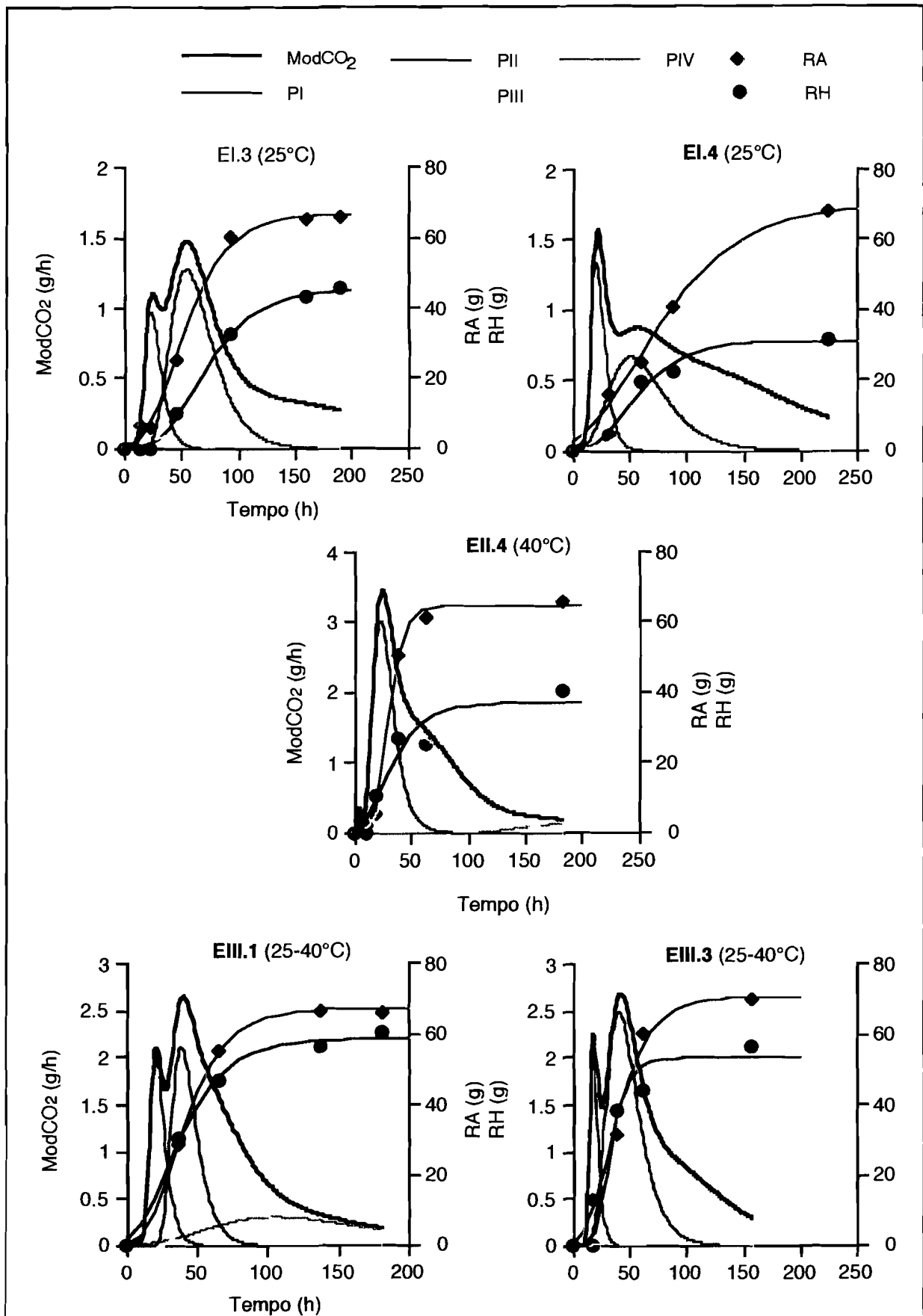


Figura 8.6- Modelo cinético de compostagem e degradação do substrato

A redução de amido pode ser explicada pela actividade das populações I e II nos ensaios EI.3, EII.4 e EIII.3 (r^2 superior a 0.99). Nos ensaios EI.4 e EIII.1 é necessário considerar também a população III, e as populações I e II degradam ainda outros compostos. No ensaio EI.3, a população III também parece estar envolvida na redução de amido.

Acrescente-se que a adição de amido sob a forma de farinha branca no início do ensaio EII.4 (ensaio EII.7) sugere que o amido é degradado durante todo o ensaio (Figura 5.9). A cada reactor juntaram-se 45g de farinha branca (peso seco) (Quadro 5.3) e a diferença, após 163h, na produção acumulada de CO_2 dos dois ensaios, é igual a 56g, pelo que se pode também concluir, considerando que 43.8% do amido é carbono (Haug, 1993, p. 248), que todo o amido é degradado a CO_2 .

No arroz comum, o amido consiste em 80% de amilopectina e 20% amilose (Nout, 1992). A composição química do amido na farinha é idêntica à do arroz (Deobald, 1972). Tratam-se de polímeros de glucose estruturalmente diferentes. Na amilose, as unidades de glucose estão unidas por ligações glucosídicas α -D-(1-4), originando um polímero linear, enquanto que a amilopectina é um polímero ramificado, constituído por monómeros de glucose com ligações entre si α -D-(1-4) e α -D-(1-6) que originam os pontos de ramificação da molécula (5%) (Martins, 1983). Diferentes enzimas são capazes de atacar parcialmente as ligações da molécula de amido, mas só as glucoamilases, que são essencialmente produzidas por bolores, nomeadamente do género *Mucor*, *Rhizopus*, *Penicillium* e *Aspergillus*, conseguem degradá-lo praticamente na totalidade a glucose (Ueda, 1988). Hesseltine *et al.* (1988) e Hesseltine e Ray (1988), citados por Nout (1992) referem que, embora por exemplo *Aspergillus* (ex: *Aspergillus oryzae*) também tenham actividade amilolítica, os bolores da família Mucoraceae, nomeadamente *Mucor* e *Rhizopus*, são os mais usados em fermentações industriais específicas.

O ajuste do modelo cinético de compostagem aos ensaios EII.4 e EII.7 para comparação das populações obrigou a que se considerasse a quantidade inicial de substrato, respectivamente, 349 e 395g de peso seco (Quadro 5.3). Verifica-se que os valores de "A" e "K" das populações I e III se alteram substancialmente com a adição suplementar de amido, enquanto que se mantêm constantes na população II (Quadro 8.2).

Quadro 8.2- Adição de amido no início do ensaio EII.4- Parâmetros característicos das populações

	EII.4			EII.7		
	Ai (g/gps)	Li (h)	Ki (g/h.gps)	Ai (g/gps)	Li (h)	Ki (g/h.gps)
PI	0.0027	3.5	0.0010	0.0039	6.2	0.0012
PII	0.2100	15.6	0.0087	0.2082	19.3	0.0083
PIII	0.3008	31.6	0.0039	0.3669	35.5	0.0049
PIV	0.0382	139.5	0.0004	0.0512	117.9	0.0005

O ajuste da equação de Gompertz aos resultados de hemicelulose permite determinar, após 168 horas, as seguintes reduções: 44 e 31g, respectivamente, nos ensaios EI.3 e EI.4, 37g no ensaio EII.4 e 58 e 53g, respectivamente nos ensaios EIII.1 e EIII.3 (Figura 8.7). As mesmas reduções expressas em percentagem equivalem a 43 e 33% respectivamente nos ensaios EI.3 e EI.4, 40% no ensaio EII.4, e 50% e 47%, respectivamente nos ensaios EIII.1 e EIII.3. No ensaio preliminar E.A, embora a temperatura do substrato tenha ultrapassado 40°C, obteve-se, no mesmo intervalo de tempo, 52% de redução de hemicelulose, o que está de acordo com a variação das temperaturas ensaiadas ($RH(\%)=51.8\exp(-\exp(1.9-0.110t))$, $n=5$).

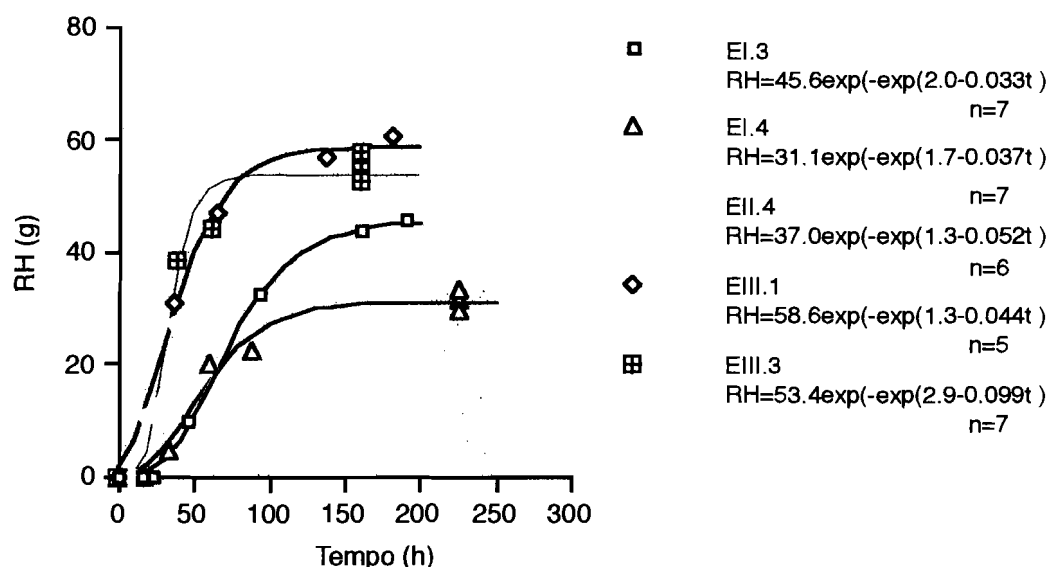


Figura 8.7- Degradação de hemicelulose

A hemicelulose não é degradada no início dos ensaios: reduções de 5 e 26% foram observadas, respectivamente, nos ensaios EI.4 e EIII.1, mas após 33 e 37 horas (Quadro A.II.2). A população I não consome a hemicelulose independentemente da temperatura (Figura 8.6).

O envolvimento da população III, nos ensaios EI.3, EI.4 e EIII.1, na redução de hemicelulose, é sugerido pela comparação de r^2 nas situações de redução de amido e redução de amido e hemicelulose (Quadro 8.3). O papel da população II na redução da hemicelulose é sugerido pelo ensaio EI.3, porque r^2 mantém-se acima de 0.99, mas sobretudo pelo ensaio EII.4, onde a população I tem um desenvolvimento incipiente. No ensaio EIII.3 a consideração da redução de hemicelulose para além do amido, piorou em todas as situações o valor de r^2 .

Quadro 8.3- r^2 na regressão linear $\text{Mod(RA+RH)}=a \text{ ModCO}_2\text{ac}+ b$

	ModCO₂ac PI+PII+PIII+IV	ModCO₂ac PI+PII+PIII	ModCO₂ac PI+PII+PIII (até t=t h) (*)	ModCO₂ac PI+PII
EI.3		0.991	0.998	0.992
EI.4		0.978	0.994	0.951
EII.4	0.892	0.898	0.983	0.989
EIII.1	0.959	0.988	0.984	0.978
EIII.3		0.916	0.946	0.982

(*) Considerou-se t igual a 150 horas, 70 e 100 respectivamente nos ensaios a 25°C, 40°C e 25-40°C

O comportamento dos ensaios EI.4 e EIII.1 avaliado através do coeficiente de determinação r^2 , da regressão linear entre a redução de amido e hemicelulose e a produção acumulada de CO₂, é distinto do comportamento dos ensaios EI.3 e EII.4, a que se acrescenta o facto dos resultados da determinação da hemicelulose, sobretudo neste último ensaio, merecerem alguma desconfiança. Esta diferença de comportamento também se notou na análise de r^2 na regressão linear entre a redução de amido e a produção acumulada de CO₂, pelo que estes dados não podem ser desprezados.

Na bibliografia, os Mucorales, que fazem parte da população II, são referidos como fungos capazes de utilizar glúcidos como o amido, de forma eficiente, que deixam compostos complexos como a celulose para serem atacados por outros microrganismos, nomeadamente *Penicillium* sp. e *Aspergillus* sp. (Hesseltine e Ellis, 1973; Gochenaur, 1984 e Sandhu e Sidhu, 1980, citados por Kjoller e Struwe, 1992). Moreau (1974) classificou *Penicillium* sp. e *Aspergillus* sp. no grupo dos bolores com fraca actividade celulolítica enquanto que actividade celulolítica de Mucorales é nula. Chang (1967) verificou que no caso de cultura pura e temperatura óptima, *Aspergillus fumigatus* (35°C) bem como *Mycelia sterilia* (35°C), ao contrário de *Mucor pusillus* (35 e 45°C), eram capazes de degradar tanto a hemicelulose como a celulose na forma de, respectivamente, xilano e papel de filtro.

8. Degradação do Substrato

Os resultados sugerem que a celulose é degradada nos ensaios a 40°C e que a lenhina não é consumida nas condições ensaiadas (Quadro A.II.2). Embora no ensaio Ell.4 (181 horas) se tenha obtido 30% de redução, respectivamente, de celulose e lenhina, no ensaio Ell.7 (163 horas) e ensaio E.A (224 horas) obteve-se reduções de, respectivamente, 7% e 16% de celulose e 0% de lenhina. Deste modo, considerou-se um valor médio para a redução de celulose no ensaio Ell.4 e desprezou-se a redução de 10% de lenhina obtida no ensaio Ell.3 (181 horas).

A redução da actividade após uma semana de ensaio a 40°C foi provocada pela ausência de substrato facilmente degradável: a adição de amido na fase final do processo de compostagem (ensaio Ell.8) originou novo aumento da taxa de produção de CO₂ (Figura 5.9). Miller (1989) refere que o substrato torna-se eventualmente o factor limitante da actividade, depois de 30-49% de redução de sólidos voláteis: valores próximos do limite inferior (28-31%) foram obtidos após uma semana nos ensaios a 40 e 25-40°C (expressões apresentadas anteriormente na Figura 8.2, $RPS(\%)=0.16ModCO_2ac+1.32$ e $RSV(\%)=1.01RPS(\%)+0.90$).

Acresce ainda que, utilizando a expressão proposta por Chandler *et al.* (1980), citados por Haug (1993, p.312), a fracção de sólidos voláteis biodegradáveis (SVB), para uma concentração inicial média de lenhina de 10% (expressa em sólidos voláteis), seria 54%, tendo-se deste modo obtido apenas uma redução de 59% desta fracção a 40°C (ensaio Ell.4, $RSV_{t_{168h}}=98g$, considerando a composição média do substrato, Quadro 5.3, $SV_{t_0}=310.2g$ e $SVB_{t_0}=167.5g$).

A relação carbono/azoto inicial está próxima do valor óptimo para o processo de compostagem (Quadro A.II.1): 30-35 segundo McGaughey e Gotaas (1955), citados por Haug (1993, p.249). A relação carbono/azoto inicial decresce para 20, se se considerar o carbono da fracção biodegradável, conforme é sugerido por Kayhanian e Tchobanoglous (1992) ($Carbono_{t_0}=153.0g$, $Carbono_{biodegradável_{t_0}}=82.6g$ e $Azoto=4.1g$, de acordo com a composição elementar apresentada no Quadro 5.2).

A concentração de azoto no substrato é idêntica, por exemplo, à da fracção orgânica crivada dos RSU de Lisboa (Silveira, 1987) e a evolução da relação carbono/azoto foi característica, tendo-se verificado que o azoto manteve-se no processo (as perdas foram inferiores a 15%) enquanto que o carbono foi degradado a CO₂ (Quadro A.II.1). Nestas circunstâncias, a correcção de azoto pareceu desnecessária. Hogan *et al.* (1989), com um substrato semelhante (apesar da concentração inicial de sólidos voláteis ser 81% contra 87% neste trabalho), e

tendo procedido à correcção de nutrientes, nomeadamente azoto, obtiveram 16% de redução de peso seco em 250 horas.

Apesar de se conhecer, no início, a totalidade dos constituintes da fracção orgânica do substrato, no fim dos ensaios verifica-se que, admitindo 100% de redução de matéria gorda e a conservação de proteína bruta, existe uma fracção de composto não caracterizada e que supõe tratar-se de produtos intermédios da degradação (Quadro 5.3 e Figura 8.8).

A degradação de lípidos é referida por Christensen e Kaufmann (1969) e Molard (1982) como das primeiras modificações bioquímicas no decurso de armazenagem incorrecta de cereais, resultante da produção de lipases, nomeadamente por *Mucor* sp., *Penicillium* sp. e *Aspergillus* sp., que conduzem ao aumento do teor em ácidos gordos livres e acidez. Srimani *et al.* (1972), citados por United Nations Industrial Development Organization (1985), tratando-se especificamente de arroz, referiram que a capacidade de formar ácidos gordos livres é maior em espécies dos géneros *Rhizopus* e *Aspergillus* do que do género *Penicillium*. Supõe-se que nos ensaios realizados, não só a população I mas também a população II tenham sido responsáveis pela redução inicial de pH (Figuras 6.3, A.I.2, A.I.4 e A.I.6).

Admitiu-se a conservação da proteína bruta, porque, conforme a NP 2030, o que é determinado é o teor de azoto total (método de Kjeidahl), que é multiplicado por um factor característico da natureza do substrato, e, tendo-se verificado que as perdas de azoto eram insignificantes, considerou-se que as proteínas do substrato foram transformadas em constituinte da biomassa. Neste sentido, Molard (1985) referiu-se à estabilidade da fracção proteica que, quando degradada, é incorporada na biomassa e Porter (1946) e Aiba *et al.* (1965), citados por Pitter e Chudoba (1990), apresentaram a composição da biomassa (vírus, bactérias, leveduras e bolores) distinguindo proteínas, polissacarídeos, lípidos e ácidos nucleicos.

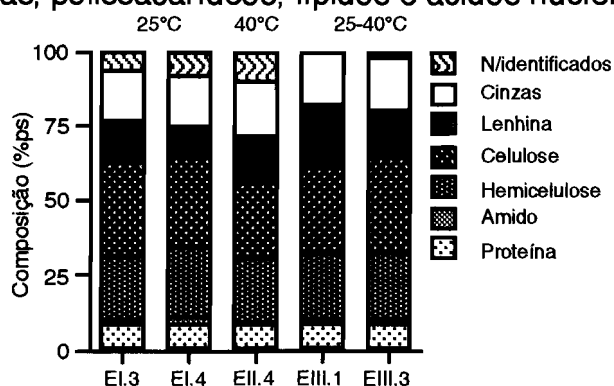


Figura 8.8- Composição do composto^(*)

(*) A composição do composto nos ensaios EII.4 e EIII.1 foi recalculada considerando os resultados do quadro 5.3, 16% de redução de celulose a 40°C e 0% de redução de lenhina

A composição final do composto não é substancialmente diferente, e o funcionamento numas condições de temperatura ou noutras significa um acréscimo de 10% na redução de peso seco. Este acréscimo não se pode traduzir na mesma redução em hemicelulose ou hemicelulose e celulose, pois verifica-se que a redução de peso seco é inicialmente igual e depois inferior à redução de amido e hemicelulose (Quadro A.II.2). Acrescente-se que o facto da relação carbono/azoto final ser ainda superior a 20 está relacionado com a natureza do carbono (Quadro A.II.1).

9. HETEROGENEIDADE

9.1 Objectivo

Este capítulo tem o seguinte objectivo:

- avaliar, em regime de temperatura fixa (25 e 40°C) e temperatura variável (25-40°C), a influência de gradientes de temperatura e humidade na degradação do substrato, através da variação espacial da concentração de amido e sólidos voláteis.

9.2 Análise dos resultados e discussão

A análise dos resultados da determinação de amido nos diferentes locais do reactor não evidencia a existência sistemática de um padrão de variação (Quadro 5.6). No ensaio Ell.4, onde se recolheram amostras mais cedo, nota-se que às 11 horas a concentração de amido nas porções "intermédio 1" e "intermédio 2" decresce do interior para o exterior e às 19 horas cresce no meio do topo para o fundo. Mas é às 39 horas que se nota nas quatro porções gradientes horizontais de amido. Nesse momento, as diferenças entre extremos atingem cinco unidades nas porções "intermédio 1" e "intermédio 2". Todas as diferenças, após 64 horas, são inferiores a 1.5. Verifica-se assim que da acumulação de diferenças na fase inicial resulta a distinção de gradientes (sobretudo horizontais) após a taxa máxima de produção de CO₂, que se reduzem posteriormente e no fim do ensaio a concentração de amido é praticamente igual em todo o reactor (Figura 9.1).

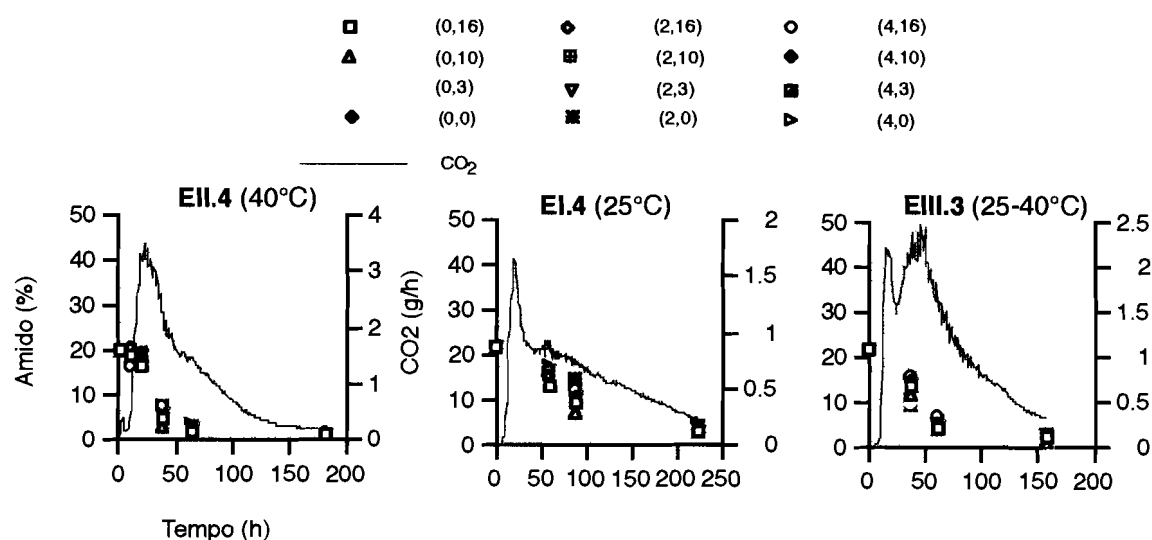


Figura 9.1- Variação na concentração de amido

9. Heterogeneidade

O comportamento dos resultados do ensaio El.4 está de acordo com o ensaio anterior: nota-se o desenvolvimento de gradientes horizontais às 60 horas nas porções topo e "intermédio 1" e em todas as porções às 88 horas. Enquanto que às 60 e 88 horas as maiores diferenças variam entre três e seis unidades, às 225 horas são inferiores a uma unidade. O gradiente vertical surge às 60 horas no interior.

A concentração de amido em determinado momento é consequência de condições anteriores, nomeadamente de temperatura e humidade. Por exemplo, no ensaio Ell.4, a temperatura média (até às 39 horas) e a humidade (no período entre as 11 e as 39 horas) na porção "intermédio 1" interior, são respectivamente 40°C e 57% e na porção "intermédio 1" exterior, 35°C e 59% (Figura 5.2 e Quadro 5.4). A concentração de amido é, às 39 horas, 3.0% na porção "intermédio 1" interior e 7.9% na mesma porção mas no exterior. Nesta porção mas no meio, nos mesmos períodos, a temperatura, a humidade e a concentração de amido são respectivamente, 38°C, 58% e 5.9%.

Apesar dos gradientes verticais serem menos frequentes ou não existirem, verifica-se, por vezes, diferença entre a concentração de amido do topo e do fundo ou entre o fundo e as porções superiores. No ensaio Ell.4, no interior topo e fundo, a temperatura média e a humidade são, nos períodos anteriormente considerados, respectivamente, 40°C e 55% e 37°C e 63%. A concentração de amido é, às 39 horas, respectivamente, 4.5% e 6.3%.

Numa análise detalhada do Quadro 5.6, mesmo nos momentos em que se reconhece a existência de gradientes, verifica-se que, no meio nas porções topo, "intermédio 1" e "intermédio 2", a concentração de amido é idêntica. Na realidade, estes resultados dizem respeito a 35% do substrato em compostagem (Quadro 5.7). Se se considerarem os outros locais onde a concentração de amido é semelhante ao meio e o respectivo peso seco, a fracção do substrato em compostagem que está nas mesmas condições aumenta e cada vez mais os valores extremos, uma vez agrupados segundo o critério de igualdade, referem-se a quantidades menores. As porções "intermédio 1" e "intermédio 2" interior podem constituir um grupo e as porções do exterior e do fundo constituem dois grupos ou até um grupo só.

Verifica-se ainda que os resultados de amido relativos ao meio são aproximadamente iguais à média aritmética dos valores do interior e exterior em cada porção. O meio não só representa uma parte significativa do substrato em

compostagem como também funciona em condições médias de temperatura e humidade.

Embora não seja rigoroso comparar quantitativamente diferenças de concentração de amido em diversos momentos com as diferenças em cada momento, verifica-se que as variações diárias são superiores às diferenças medidas entre locais consecutivos no sentido do gradiente em cada momento (Figura 9.2). No ensaio Ell.4, todas as diferenças no período 19-39 horas são pelo menos o triplo da maior diferença medida às 39 horas, e no período seguinte, 39-64 horas, 80% das diferenças são mais do dobro da maior diferença medida às 64 horas. No ensaio El.4, 60% das diferenças no período 60-88 horas são superiores à maior diferença registada às 88 horas. E no ensaio EIII.3, todas as diferenças diárias são pelo menos o triplo da maior diferença medida às 62 horas. Daí que fosse notória a variação diária do aspecto macroscópico dos reactores enquanto que não eram evidentes diferenças entre as porções.

A análise dos resultados de sólidos voláteis permite verificar que, por exemplo no ensaio Ell.4, 50% das diferenças entre locais consecutivos na horizontal são iguais ou inferiores a 0.5 enquanto que na vertical aquela percentagem é superior a 50% (Quadro 5.5). No ensaio El.4, estas percentagens correspondem, respectivamente, a 80% e a mais de 90%. A variação da concentração de sólidos voláteis durante os ensaios de compostagem é relativamente reduzida: de 87-88% no início obtem-se entre 81-84% no fim, consoante as condições (Quadro 5.3). Verifica-se, assim, que dada a amplitude da variação, é difícil a avaliação de gradientes através da determinação do teor de cinza total.

O ensaio EIII.3 (25-40°C) teve um comportamento distinto relativamente aos ensaios de temperatura fixa: a concentração de amido aumenta do interior para o exterior e do fundo para o topo (Quadro 5.6). A degradação foi relativamente mais importante em locais onde a temperatura é menor e a humidade atinge valores que se esperava que fossem limitantes (Figura 5.2 e Quadro 5.4). Robinson e Stentiford (1993) e Miller (1989), referem situações em que a actividade é mantida para além do que seria de esperar dados os níveis de humidade (22-35%), com base na colonização eficaz do substrato. De qualquer forma, nos momentos em que se reconhece a existência de gradiente (Quadro 5.6), cerca de 40 a 45% do substrato em compostagem está nas condições do meio e esta percentagem pode ser aumentada de acordo com o critério de igualdade (Quadro 5.7). Também se verifica que a média aritmética dos valores dos extremos é aproximadamente igual ao meio.

Depois da temperatura atingir os 40°C, os ensaios a temperatura variável têm um comportamento idêntico aos ensaios a 40°C: o gradiente de temperatura é semelhante embora não se observe inversão (Figura 5.2). Durante a subida de temperatura de 25°C para 40°C não há praticamente diferença entre as temperaturas dos diversos locais do substrato em compostagem e, nesta fase, é sobretudo a população I que se desenvolve. Quando se atinge 40°C e se modifica a forma de controlo da instalação piloto de compostagem, desenvolve-se o gradiente e a temperatura do substrato varia no intervalo 30-42°C. Nestas circunstâncias, o exterior e o fundo, apesar da humidade, estão nas condições de temperatura que especialmente favorecem a população I, enquanto que nos outros locais do reactor a situação é exactamente a contrária. Os efeitos de actividade diferenciada da população I não são anulados pela acção das outras populações.

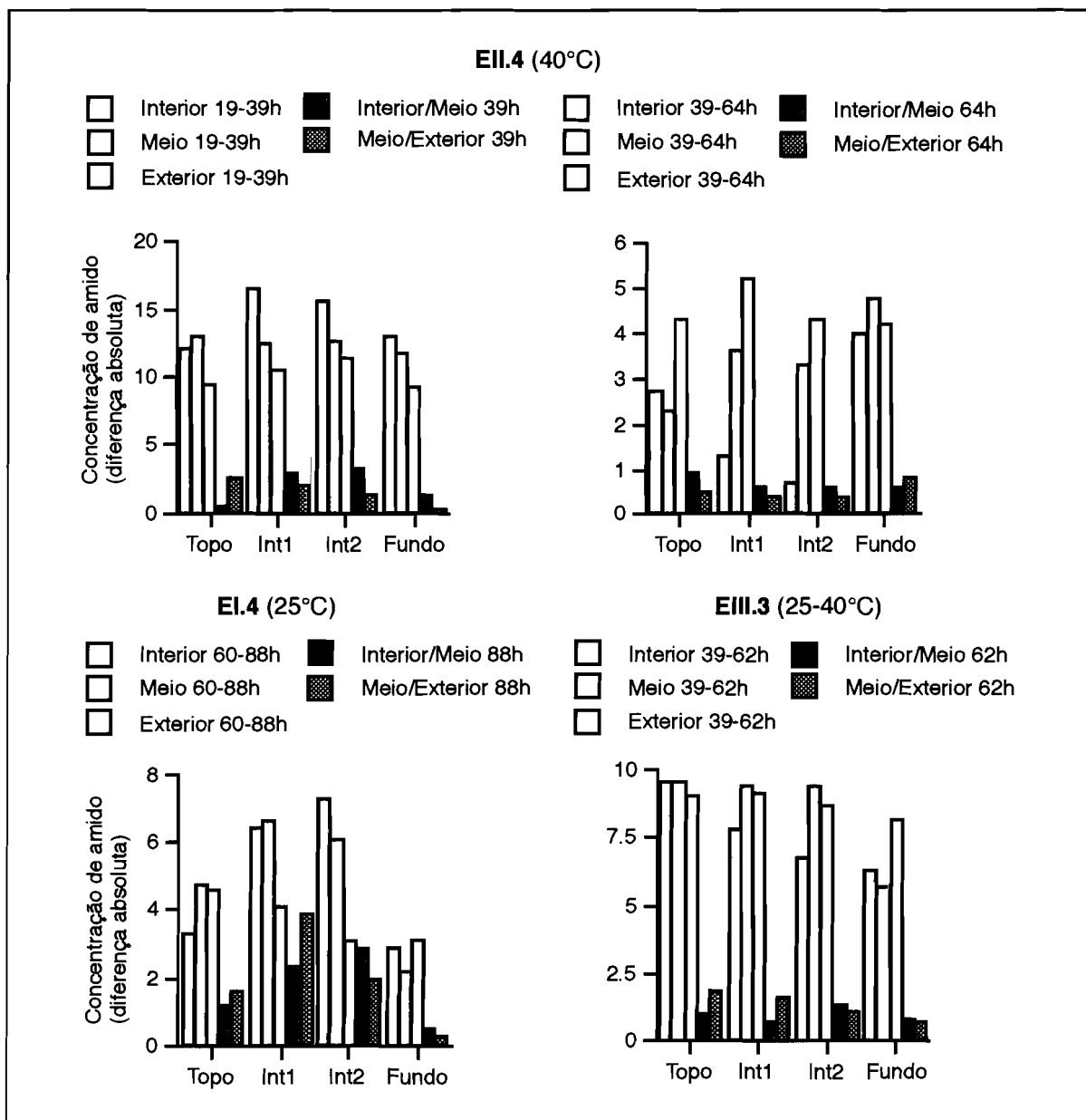


Figura 9.2- Diferenças de concentração de amido

10. DISCUSSÃO

A ocorrência de dois máximos na evolução na taxa de produção de CO₂, relacionados com o aumento de temperatura característico do processo de compostagem e a substituição de uma população mesofílica por uma termofílica, suscitou a necessidade de esclarecer em que medida a variação da taxa de produção de CO₂, quando não condicionada pela variação da temperatura, resulta da sucessão de populações.

A instalação piloto de compostagem foi construída para funcionar em condições isotérmicas (25 e 40°C) e em condições adiabáticas (na fase de elevação da temperatura de 25 até 40°C, nos ensaios 25-40°C). Verificou-se que a instalação funcionou conforme previsto em condições adiabáticas mas, em condições isotérmicas, geravam-se gradientes de temperatura (§6.2.2). A quantidade de substrato em compostagem foi excessiva para evitar a formação, através do controlo das perdas de calor por condução, de gradientes de temperatura horizontais, bem como a forma do reactor e o modo de arejamento favoreceram o desenvolvimento de gradientes verticais. Embora tenha sido importante, sobretudo no estudo da população I, o funcionamento em condições adiabáticas, é difícil na mesma instalação compatibilizar os dois modos de funcionamento (temperatura constante e adiabático).

A variação da humidade no tempo foi uma consequência das perdas de calor por condução no funcionamento da instalação, e a análise da sua variação espacial permitiu distinguir sobretudo o fundo, que apresentava valores eventualmente limitantes, por excesso, do processo de compostagem (§6.2.3). Verificou-se ainda que condições diferenciadas de temperatura e humidade se reflectiam, em determinado momento, nas condições de degradação (Figura 9.1). Uma análise detalhada da concentração de amido nos diversos locais permitiu verificar que, de qualquer modo, a maior fracção da massa de substrato no reactor estava nas mesmas condições de degradação, influenciando de forma determinante o processo de compostagem (§9.2).

Globalmente, verificou-se que a evolução de pH (§6.2.4) e da degradação do substrato (Figuras 8.2 e 8.4) eram características do processo de compostagem, bem como a sua variação com a temperatura. Foi possível associar a degradação do substrato essencialmente à redução completa do amido a CO₂ e à degradação incompleta da hemicelulose. A 40°C admitiu-se uma redução de celulose de 16%. Os ensaios nas condições mais favoráveis (40°C), terminaram por ausência de substrato facilmente degradável (EII.8). O facto da redução de sólidos voláteis estar

no limite mínimo dos valores normais em compostagem ou de só 59% dos sólidos voláteis biodegradáveis terem sido, nas condições mais favoráveis, degradados, teve a ver com a forma de apresentação da hemicelulose e da celulose no substrato. Foi degradada a totalidade da hemicelulose e da celulose da farinha branca e da farinha escura. Nos materiais de origem vegetal, a ligação da hemicelulose e da celulose à lenhina limita a sua degradabilidade (Lynch, 1993), e Neish (1965), citado por Houston (1972), refere especificamente que na casca de arroz, a hemicelulose está quimicamente associada à lenhina. Clemente (1983) acrescenta que a fraca degradabilidade da casca de arroz resulta do arranjo estrutural sílica-celulose. A fragmentação das fibras sugerida por Golueke (1981), justifica a degradabilidade da hemicelulose e da celulose provenientes das farinhas. O processo de compostagem não parece ter sido limitado pela deficiência de outros nutrientes, nomeadamente de azoto.

Acrescente-se que embora a evolução, a 25 e 40°C, do pH (§6.2.4) e da relação entre a produção acumulada de CO₂ e a redução de sólidos voláteis (Quadro A.II.2) sugerissem um atraso relativo na degradação a 25°C, a constatação de a redução de sólidos voláteis, apesar do prolongamento dos ensaios, ser inferior a 25°C (§8.2), levantou a hipótese do processo de degradação ser distinto. A diferença pode resultar da degradação da celulose a 40°C, embora não tenha sido feita a sua determinação nos ensaios EI.1 e EI.2 (450h). Chang (1967) verificou que os fungos termofílicos são mais eficazes que os mesofílicos na degradação da celulose.

Verificou-se que, mesmo em condições de temperatura fixa, a variação da taxa de produção de CO₂ apresentava dois máximos: sistematicamente, o aspecto macroscópico do substrato em compostagem não se alterava durante o primeiro máximo de CO₂, mantendo-se castanho, enquanto que o segundo máximo estava associado ao desenvolvimento espectacular de micélio, cinzento a 25°C e branco a 40°C. No caso do funcionamento a 40°C, comparado com o comportamento a 25°C, verificou-se a redução da duração do primeiro máximo e a mudança mais rápida do aspecto do substrato para a cor branca do micélio. Acresce ainda que nos ensaios em que a temperatura do substrato subia de 25°C até 40°C, mantendo-se depois constante, o primeiro máximo de CO₂ era aumentado e o substrato mantinha por mais tempo a cor castanha.

O modelo cinético de compostagem foi desenvolvido directamente a partir da taxa de produção de CO₂, dado que a variação da concentração de CO₂, medida em contínuo, no caudal constante de ar de saída dos reactores estava directamente relacionada com a modificação do aspecto macroscópico do substrato. Assumi-

se, assim, que a taxa de produção de CO₂ resultava da actividade de diferentes populações sequencialmente presentes, com possibilidade de sobreposição parcial. Trata-se de um modelo aditivo de funções de Gompertz, em que cada função representa o CO₂ produzido por uma população. O comportamento do modelo, a sua coerência e adequação ao processo de compostagem foi estudada através da variação da duração e temperatura dos ensaios, a que se associou a identificação dos bolores activos.

A alteração da temperatura provocou, de forma previsível, a modificação dos parâmetros característicos, "A", "K", "L", de cada população (§7.3.4.4). O funcionamento a 40°C traduziu-se no aumento relativo da taxa máxima de produção de CO₂ e na redução da duração da fase de latência. O comportamento da população I distinguiu-se do comportamento das outras populações pela existência de um máximo da taxa de produção de CO₂ no intervalo 25-40°C.

Os bolores identificados são comuns no tipo de substrato usado. A ordem de desenvolvimento das populações na sucessão estava de acordo com as suas características intrínsecas, nomeadamente taxa de crescimento e temperaturas de funcionamento (§7.4). Assim, a população de bactérias era a primeira a surgir, a população II incluía bolores da ordem Mucorales, tendo-se observado alteração dos géneros com a temperatura, e a população III, bolores do género *Penicillium* ou *Aspergillus*, respectivamente a 25 e 40°C. Admitiu-se que a sucessão de populações nos ensaios a 25-40°C foi semelhante à verificada nos ensaios a 40°C, dado que a variação inicial da temperatura de 25 para 40°C foi rápida (Figura 7.37), favorecendo sobretudo a população I e traduzindo-se numa diferença de 2% na redução de peso seco.

Para as soluções escolhidas, os pressupostos de distribuição Normal do erro e de valor médio zero foram cumpridos. A análise gráfica da dispersão do resíduo em função do tempo e do valor de CO₂ estimado mostrou a sua não independência ou autocorrelação e a presença de variância não homogénea. Em relação a este último aspecto, verificou-se, que os resíduos são relativamente menores no início e no final dos ensaios do que na fase intermédia, o que está relacionado com o valor de CO₂ medido. Esta questão pode ser eventualmente resolvida através da atribuição de pesos distintos aos resíduos, na tentativa de tornar a variância homogénea, embora seja difícil a escolha do critério (Bates e Watts, 1988, p.91).

A não independência dos resíduos, isto é, o resíduo no momento i está correlacionado com o resíduo no momento $i-k$, sendo k os diferenciais de tempo em que tal acontece, foi observada sobretudo depois de 50-100 horas, consoante

a temperatura do ensaio. As características temporais dos dados conferem ao modelo cinético uma componente estocástica que dificilmente terá um comportamento típico de um modelo de regressão tradicional (Bates e Watts, 1988, p.92).

A modelação do erro no sentido de se resolver os problemas de variância não homogénea e de autocorrelação, por forma a se obter um erro com as características desejáveis teria sido, do ponto de vista teórico, a situação ideal em termos da parametrização do modelo cinético. A dificuldade em parametrizar o modelo teórico (com modelação da componente estocástica) por sair do âmbito das técnicas de regressão tradicionais, levou a que não se considerasse este aspecto. A principal consequência desta opção é a estimação enviesada da variância do erro, comprometendo os testes de significância, mas estando salvaguardados os valores estimados dos parâmetros (Amaro, 1997, p.69). De qualquer modo, a solução para cada ensaio foi comparada com as soluções obtidas para os outros ensaios e com a observação da alteração do aspecto macroscópico do substrato e da substituição dos bolores activos.

No desenvolvimento do modelo, tornou-se clara a importância da complementação dos dados de actividade com a identificação dos microrganismos activos e a necessidade de encontrar métodos microbiológicos adequados que, nomeadamente, permitissem, em tempo real, processar muitas amostras. O método usado neste trabalho para a identificação dos bolores é meramente qualitativo, o que torna difícil, na presença em simultâneo de mais de uma espécie, deduzir as contribuições relativas para a produção de CO₂.

Pretendeu-se alargar esta abordagem a outros tipos de microrganismos, nomeadamente bactérias, tendo-se recorrido a padrões de utilização de carbono (galerias Biolog™). Esta técnica foi abandonada por ser necessário o isolamento prévio das colónias em placas para obter culturas puras e só posteriormente se proceder à identificação, através do modo de utilização de diferentes tipos de carbono. O primeiro destes passos condiciona drasticamente o resultado final. A utilização directa com amostras de solo e populações mistas, no sentido da classificação das comunidades bacterianas, foi ensaiada em trabalhos recentes, onde as preocupações são ainda metodológicas (fiabilidade, reprodutibilidade e interpretação de resultados) (Garland e Mills, 1991; Haack *et al.*, 1995). Recentemente, Insam *et al.* (1996a,b) investigaram se uma abordagem fisiológica baseada em padrões de utilização de carbono, concretamente também através de galerias Biolog™, seria suficiente para distinguir as comunidades microbianas em diferentes momentos da compostagem e zonas de uma pilha de composto, tendo

igualmente chegado à conclusão que é necessária mais investigação para melhorar o método, nomeadamente no que respeita à duração e à temperatura de incubação e ao tamanho de inóculo.

Deste modo, assumiu-se que as observações feitas para os bolores seriam verdadeiras para outros microrganismos. Acrescente-se que, embora sem sucesso, se procurou determinar a importância dos bolores em relação aos outros microrganismos, nomeadamente bactérias, através da adição de um antibiótico (cloranfenicol), à água usada para corrigir a humidade inicial do substrato. Na bibliografia, é possível encontrar estimativas do *ratio* de biomassa fungos:procariotes em composto, 1.8:1 (Straatsma *et al.* 1994), 0.9:1 e 2.3:1 (Wiegant, 1992 citado por Straatsma *et al.* 1994) mas que variam com as condições de compostagem. Tseng *et al.* (1996) referem a importância da contribuição da biomassa fúngica, concretamente fungos filamentosos, para o ATP medido, sobretudo na segunda metade de ensaios de compostagem a 40°C, que não cresceram a 60 e 70°C.

As singularidades da evolução da taxa de produção de CO₂ foram associadas à sucessão de populações. Se a substituição da população I pela II era evidente através da alteração do aspecto macroscópico do substrato, a passagem da população II para a III foi justificada pela observação da substituição progressiva dos bolores da ordem Mucorales, géneros *Penicillium* e *Aspergillus*, respectivamente, a 25°C e 40°C.

O modelo da cinética da partícula (CPK) (Hamelers, 1993) e o modelo de compostagem desenvolvido por Kaiser (1996), permitem prever a evolução da taxa de consumo de oxigénio ou da produção de CO₂, mas enquanto que o primeiro considera dois tipos de substrato (polimérico insolúvel e monomérico solúvel) e um tipo de biomassa, a cinética do modelo de Kaiser envolve quatro tipos de microrganismos e quatro substratos diferentes.

A evolução da taxa de consumo de oxigénio obtida através do modelo da cinética da partícula, apresenta apenas um máximo e as singularidades da curva são explicadas através de limitações devidas ao crescimento da biomassa, ao transporte de oxigénio e à hidrólise do substrato. O modelo não prevê a existência de vários máximos facto que, segundo o autor (comunicação pessoal, 1995), resulta da consideração de um tamanho único de partículas e na realidade, existir uma distribuição de dimensões. O modelo interpreta a evolução da taxa de produção de CO₂ como resultado da acção de uma população única e determina uma taxa específica máxima de crescimento global. Pelo contrário, o modelo

desenvolvido nesta dissertação baseia-se na consideração e interpretação dos vários máximos na evolução da taxa de produção de CO₂.

No caso da ocorrência de um único máximo da taxa de produção de CO₂ (ensaios E.A e E.B, acima de 40°C) o aumento inicial da actividade dos microrganismos (desenvolvimento das populações II e III, Figura 7.26) é associado pelo modelo CPK a limitação pela cinética de crescimento da biomassa e o decréscimo de actividade (correspondente à redução da população II e ao progressivo aumento da população III) é explicado por limitação difusional do oxigénio.

Hamelers (1993) não conseguiu contudo, justificar o decréscimo súbito e muito acentuado da taxa de actividade verificado às 24 horas, também observado nos ensaios apresentados nesta dissertação. Relativamente à fase final do ensaio, correspondente ao desenvolvimento da população IV, a adição suplementar de amido (ensaio EII.8) mostrou que a actividade era limitada pela ausência de substrato facilmente degradável e o modelo CPK identificou um período limitado pela taxa de hidrólise de substrato polimérico.

O modelo da cinética da partícula e o modelo desenvolvido por Kaiser (1996) são abordagens conceptuais que integram aspectos respectivamente de transporte difusional e de termodinâmica com as cinéticas da conversão da matéria orgânica e crescimento microbiano (ex: Lei de Fick e cinética tipo de Monod). Deste modo é possível, atribuindo às constantes valores, obtidos com outros sistemas em condições diversas, simular diferentes situações de compostagem. Mas é indispensável verificar a consistência das condições simuladas. Kaiser (1996) apenas verifica o modelo com resultados experimentais no que respeita a dados de temperatura e de concentração de CO₂, obtidos num ensaio de compostagem. No entanto, não é avaliada a qualidade do ajustamento entre os resultados experimentais e os gerados pelo modelo. O esquema conceptual que relaciona os substratos-tipo e os microrganismos, se bem que interessante, não foi verificado.

Reed (1997) chamou a atenção para o conflito entre generalidade e precisão, que opõe os modelos mecanicistas e os modelos descritivos, também designados por empíricos. Os primeiros, em que se incluem o modelo de compostagem de Kaiser (1996) e o modelo CPK (Hamelers, 1993), consideram na sua formulação a compreensão de processos que contribuem para o fenómeno global, enquanto que os modelos descritivos, como de Haug (1993), traduzem, em condições bem definidas, o comportamento de um sistema particular. O potencial uso de um dado modelo depende da finalidade para que foi desenvolvido, da escala temporal em que opera e das hipóteses em que assentou o seu desenvolvimento. Se por um

lado os modelos descritivos são úteis apenas num intervalo estreito de condições, por outro lado, o esforço de incorporação de níveis cada vez mais elevados de detalhe dos processos envolvidos, pode tornar os modelos mecanicistas menos úteis ou até inaplicáveis. A modelização cinética por ajustamento paramétrico proposta nesta dissertação tem carácter mecanicista, na medida em que foi verificada a consistência dos pressupostos biológicos (dinâmica de populações microbianas) em que se baseou. Hamelers (1993) criticou os modelos descritivos por serem empíricos e portanto de aplicação limitada, mas na realidade todos os modelos são empíricos na medida em que necessitam de dados experimentais para a sua parametrização (Reed, 1997).

A hipótese da sucessão de fungos relacionada directamente com composição de substrato, isto é, fungos capazes de degradar glúcidos simples, fungos celulolíticos, fungos da lenhina e finalmente fungos de glúcidos "secundários" foi discutida por vários autores (Frankland 1992; Kjoller e Struwe 1992): a relação não é clara, muitas espécies têm uma larga capacidade enzimática e existem poucas evidências que a morte dos microrganismos se deva ao envelhecimento ou exaustão do substrato. Verificou-se assim, que a população I era substituída pela população II embora existisse amido por degradar. A produção máxima de CO₂ das populações I e II é distinta a 25°C e 40°C, o que sugere também que a substituição da população II pela população III não seja devida à exaustão do substrato. Acrescente-se que apesar da população II incluir bolores capazes de degradar o amido em glucose, se verificou que o amido aparentemente era consumido durante todo o ensaio.

A sucessão, conforme foi avaliada através de bolores, parece estar ligada com o aparecimento de populações com um aparelho enzimático sucessivamente mais complexo e que sendo capazes de degradar, embora de uma forma menos eficiente, compostos simples, nomeadamente o amido como a população anterior, também são capazes de consumir outros compostos, nomeadamente de natureza celulósica. Este é o fundamento conceptual do trabalho de Kaiser (1996) no desenvolvimento do modelo de compostagem, quando associa microrganismos, capacidade crescente de degradação e simultaneamente redução relativa da taxa de crescimento. Assim, as bactérias degradam glúcidos simples e amido, com $\mu_{\text{máx}}$ 0.2h⁻¹, as actinomicetes decompõem glúcidos simples, amido e hemicelulose, com $\mu_{\text{máx}}$ 0.1h⁻¹, os "fungos castanhos" degradam os compostos anteriores e a celulose, com $\mu_{\text{máx}}$ 0.05h⁻¹ e finalmente os "fungos brancos" também degradam a lenhina, com $\mu_{\text{máx}}$ 0.03h⁻¹.

Apesar de na bibliografia, os bolores da ordem Mucorales não estarem associados com a degradação de compostos celulósicos, os resultados obtidos não foram concludentes relativamente à ligação da população II com a redução da hemicelulose e a produção de CO₂. Embora a produção máxima de CO₂ das populações I e II seja distinta a 25 e 40°C, a substituição da população II pode estar relacionada com a concentração de amido e a capacidade da população III para degradar a hemicelulose. Os bolores da ordem Mucorales invadiram rapidamente o substrato, enquanto que *Penicillium* sp. e *Aspergillus* sp. se desenvolveram de forma relativamente mais localizada, o que está de acordo com uma distribuição posterior não homogênea de amido. Para além disso, *Penicillium* sp. e *Aspergillus* sp. têm um aparelho enzimático capaz de degradar compostos celulósicos. Frankland (1992) referiu que os mecanismos usados na explicação da sucessão em plantas superiores, nomeadamente de facilitação, inibição e tolerância, podem ser aplicáveis a fungos na decomposição de matéria orgânica. Na última situação, os microrganismos substituem os anteriores porque conseguem desenvolver-se num nível inferior de recursos.

Os parâmetros "K" e "A" característicos da população II não se alteraram com o aumento da concentração inicial de amido (EII.7), o que sugere que "K" é a taxa máxima da população II (Pitter e Chudoba, 1990, p.17) e o facto de "A" não variar pode estar associado, segundo Bailey e Ollis (1986, p.400), à acumulação de produtos tóxicos ou à existência de outro nutriente limitante. Frankland (1992), referiu que as limitações do crescimento podem ser devidas mais à acumulação de toxinas do que à exaustão de nutrientes.

A sucessão típica do processo de compostagem caracterizada pela redução da actividade de uma população mesofílica inicial que é progressivamente substituída por uma população termofílica quando a temperatura atinge 40°C foi também observada nesta dissertação (Finstein, 1980; Miller, 1992). A população I nos ensaios realizados teve o comportamento característico de uma população mesofílica que foi substituída, nos ensaios a 40 e 25-40°C, pela população termofílica (populações II e III). Embora a sucessão de microrganismos em compostagem seja condicionada pela temperatura, verificou-se que ocorre em condições de temperatura fixa e a sequência depende das características dos microrganismos, nomeadamente da taxa de crescimento e do aparelho enzimático. A variação da temperatura, no intervalo ensaiado, não altera substancialmente a sucessão condicionada pela composição do substrato, e os microrganismos são substituídos (género ou espécie), de acordo com a sua tolerância à temperatura. De qualquer modo, o substrato usado (50% casca de arroz, 34% farinha escura,

16% farinha branca) mostrou ser demasiado complexo para o estudo da sucessão de populações. A adição suplementar de hemicelulose, bem como a determinação de compostos intermédios da sua degradação para além de gorduras e proteínas, teria sido importante para a compreensão do processo de degradação do substrato.

O modelo cinético desenvolvido nesta dissertação é sustentado com observações e determinações biológicas, permite relacionar microrganismos e actividade, e atribuir um significado quantitativo às variações da taxa de produção de CO₂, contribuindo, para além de uma avaliação global, para uma análise no sentido de uma intervenção dirigida, de interesse prático, no processo de compostagem.

11. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO

Do trabalho realizado no âmbito desta dissertação, conclui-se que:

- a instalação piloto de compostagem, permitiu obter resultados fiáveis e de excelente reprodutibilidade e embora não funcionasse em condições isotérmicas, a evolução da humidade, do pH, e a degradação do substrato com a temperatura foram características do processo de compostagem;
- os métodos microbiológicos usuais, que incluem a cultura e isolamento em placas para contagem de colónias e identificação posterior, mostraram ser inadequados tanto no caso de bactérias como de bolores, para a determinação dos microrganismos activos; o recurso à identificação directa e sistemática à lupa do substrato em compostagem, permitiu ultrapassar a limitação anteriormente referida dos métodos microbiológicos usuais com a identificação dos bolores activos;
- a consistência da interpretação da evolução da taxa de produção de CO₂ através da sucessão de populações foi demonstrada através da variação da duração e da temperatura dos ensaios, da observação da alteração do aspecto macroscópico do substrato e da modificação do género dos bolores activos; a degradação de componentes específicos do substrato, nomeadamente amido e hemicelulose, relacionada com a actividade de cada população, permitiu reforçar a hipótese da sucessão de populações;
- o prolongamento dos ensaios mostrou-se essencial para a aplicação do modelo cinético de compostagem, na estimação das populações, e para a identificação da sucessão de microrganismos;
- a escolha da melhor solução por um processo de aproximação em que foram ponderados simultaneamente diversos aspectos, nomeadamente de análise gráfica e intervalos de confiança assintóticos, mostrou-se adequada por ser compatível com outras soluções obtidas em ensaios nas mesmas condições e com a observação da alteração do aspecto macroscópico do substrato e com a identificação dos bolores activos;
- a evolução da taxa de produção de CO₂ reflecte a dinâmica das populações microbianas no processo de compostagem pelo que, não pode ser considerada de uma forma global como se de uma população única se tratasse; para além disso, a medição em contínuo da taxa de produção de CO₂ mostrou ser um método eficaz, suficientemente sensível na avaliação do processo de degradação; o

desenvolvimento do modelo com base na taxa de produção de CO₂ mostrou ser um caminho promissor, tendo sempre de ser complementado com dados de natureza microbiológica;

Na sequência do trabalho realizado considera-se importante prosseguir trabalho de investigação para a identificação da quarta população em ensaios a 40°C e verificar se o pressuposto da sucessão das populações, baseado na alteração do aspecto macroscópico do substrato e dos bolores activos, é extensível a outros microrganismos, nomeadamente bactérias. O cumprimento deste objectivo implica a tarefa de encontrar métodos que permitam distinguir, em tempo real, os microrganismos activos. Numa fase posterior seria de interesse avançar no esclarecimento da forma como os microrganismos se relacionam numa dada população e entre populações.

Seria também interessante verificar a influência no modelo cinético de compostagem de condições físicas heterogéneas, explorar outras condições, nomeadamente de temperatura e humidade tendo em vista o desenvolvimento de um modelo de compostagem e ensaiar a aceleração do processo de degradação com base nas características das populações.

Na construção do modelo matemático de compostagem seria importante resolver as questões de variância não homogénea e de autocorrelação dos resíduos, de modo a que sejam cumpridos os pressupostos associados ao método dos mínimos quadrados.

A validação do modelo cinético, em reactores de compostagem, à escala real seria também um objectivo de investigação.

Considera-se ainda a possibilidade de utilização da instalação piloto de compostagem, dadas as suas características, para estudos de degradação de poluentes orgânicos, enquanto contaminantes de substratos sólidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adani, F.; P.L. Genevini; F. Gasperi; G. Zorzi (1997)- Organic matter evolution index (OMEI) as a measure of composting efficiency. Compost Science & Utilization, 5(2), 53-62.

Albonetti, S.G.; G. Massari (1979)- Microbiological aspects of a municipal waste composting system. European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology, 7, 91-98.

Amaro, A.P.N. (1997)- Modelação do crescimento de povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill de 1ª rotação em Portugal. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Amner, W.; A.J. McCarthy; C. Edwards (1988)- Quantitative assessment of factors affecting the recovery of indigenous and released thermophilic bacteria from compost. Applied and Environmental Microbiology, 54(12), 3107-3112.

Ashbolt, N.J.; M.A. Line (1982)- A bench-scale system to study the composting of organic wastes. Journal of Environmental Quality, 11(3), 405-408.

Atkinson, C.F.; D.D. Jones; J.J. Gauthier (1996a)- Biodegradabilities and microbial activities during composting of oxidation ditch sludge. Compost Science & Utilization, 4(1), 84-96.

Atkinson, C.F.; D.D. Jones; J.J. Gauthier (1996b)- Biodegradabilities and microbial activities during composting of municipal solid waste in bench-scale reactors. Compost Science & Utilization, 4(4), 14-23.

Atkinson, C.F.; D.D. Jones; J.J. Gauthier (1996c)- Biodegradabilities and microbial activities during composting of poultry litter. Poultry Science, 75, 608-617.

Bach, P.D.; M. Shoda; H. Kubota (1984)- Rate of composting of dewatered sewage sludge in continuously mixed isothermal reactor. Journal of Fermentation Technology, 62(3), 285-292.

Bach, P.D.; M. Shoda; H. Kubota (1985)- Composting reaction rate of sewage sludge in an autothermal packed bed reactor. Journal of Fermentation Technology, 63(3), 271-278.

Referências Bibliográficas

Bach, P.D.; K. Nakasaki; M. Shoda; H. Kubota (1987)- Thermal balance in composting operations. Journal of Fermentation Technology, 65(2), 199-209.

Bagstam, G.; h. Swensson (1976)- Experiments made in bench scale composters. II- Composting of spruce-bark. Vatten, 1, 45-53.

Bagstam, G. (1977)- Experiments made in bench scale composters. III- Composting of spruce-bark together with sewage sludge. Vatten, 3, 239-250.

Bagstam, G. (1978)- Population changes in microorganisms during composting of spruce-bark. I-Influence of temperature control. European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology, 5, 315-330.

Bailey, J.E.; D.F. Ollis (1986)- Biochemical engineering fundamentals. Second edition. McGraw-Hill- Chemical Engineering Series.

Balis, C.; J. Chatzipavlidis; K. Lasaridi; P. Katsaris; E. Papadimitriou (1995)- Thermogradient respirometry as a method for ssessing compost stabilization and co-composting potential. First international symposium on biological waste mangement "a wasted chance ?". Organized by W. Bidlingmaier- University of Essen and R. Stegmann- Technical University of Hamburg. 4-6 April, Harburg.

Bars, J.; L. Escoula (1973)- Champignons toxigènes des fourrages secs et ensilés. Bulletin Officie International des Epizooties, 79 (9-11), 1213-1246.

Bates, D.M.; D.G. Watts (1988)- Nonlinear regression analysis & its applications. John Wiley & Sons Inc., New York.

Beffa, T.; M. Blanc; J.L. Fischer; P.F. Lyon; L. Marilley; M. Aragno (1995)- Composting: a microbiological process. Recovery, recycling and re-integration. Edited by A. Barrage and X. Edelman. EMPA, Dubendorf.

Beffa, T.; M. Blanc; L. Marilley; J.L. Fischer; P.F. Lyon; M. Aragno (1996)- Taxonomic and metabolic microbial diversity during composting. The science of cornposting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Belle, W.A. (1996)- Waste management and legislation. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Benefield, L.D.; C.W. Randall (1980)- Biological process design for wastewater treatment. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Bertoldi, M. de; F. Zucconi (1980)- Microbiologia della trasformazione dei rifiuti solidi urbani in compost e loro utilizzazione in agricoltura. Ingegneria Ambientale, 9(3), 209-216.

Bertoldi, M. de; G. Vallini; A. Pera; F. Zucconi (1982)- Comparasion of three windrow compost systems. BioCycle, March/April, 45-50.

Bertoldi, M. de; G. Vallini; A. Pera (1983)- The biology of composting: a review. Waste Management & Research, 1, 157-176.

Bertoldi, M. de; A. Rutili; B. Citterio; M. Civilini (1988)- Composting management: a new process control through O₂ feedback. Waste Management & Research, 6, 239-259.

Bertoldi, M. de (1993)- Compost quality and standard specifications: european perspective. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.

Bertoldi, M. de (1995a)- Composting challenges in Italy and legislation. ORCA Technical Document nr. 5- "The challenge- fitting composting and anaerobic digestion into integrated waste management". Proceedings of the Orca Congress, Brussels, Belgium.

Bertoldi, M. de (1995b)- Fundamentals of aerobic waste treatment. First international symposium on biological waste mangement "a wasted chance ?". Organized by W. Bidlingmaier- University of Essen and R. Stegmann- Technical University of Hamburg. 4-6 April, Harburg.

Bishop, P.L.; N.E. Kinner (1986)- Aerobic fixed-film processes. Biotechnology. Vol. 8. Edited by H.J. Rehm and G. Reed. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.

Blanc, M.; T. Beffa; M. Aragno (1996)- Biodiversity of thermophilic bacteria isolated from hot compost piles. (Poster). The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Referências Bibliográficas

Border, D.; R. de Garmo; K. Panter (1996)- A review of features, beneficts and costs of tunnel composting systems in Europe and in the USA. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Brethouwer, T.D.; J. van Tubergen (1995)- Composting and the quality of compost in The Netherlands. First international symposium on biological waste mangement "a wasted chance ?". Organized by W. Bidlingmaier- University of Essen and R. Stegmann- Technical University of Hamburg. 4-6 April, Harburg.

Brinton, W.F.; M.W. Droffner (1994)- Windrow composting of a pulp and paper mill sludge: process performance and assessment of product quality. Compost Science & Utilization, 2(3), 12-17.

Brown, D.; P. Rothery (1993)- Models in biology: mathematics, statistics and computing. John Wiley & Sons, Chichester, England.

Cahagnier, B.; J. Poisson (1982)- Analyses microbiologiques qualitatives et quantitatives (bactéries, levures, moisissures). Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés. Vol. 1. J.L. Multon. Technique & Documentation, Lavoisier.

Campbell, C.D.; J.F. Darbyshire; J.G. Anderson (1990)- The composting of tree bark in small reactors- adiabatic and fixed-temperature experiments. Biological Wastes, 31, 175-185.

Cechi, J.S.; P. Hartman; M. Macek (1994)- Bacteria and protozoa population dynamics in biological phosphate removal systems. Water Science and Technology, 29(7), 109-117.

Chang, Y.; H.J. Hudson (1967)- The fungi of wheat straw compost. I- Ecological studies. Transations British Mycology Society, 50(4), 649-666.

Chang, Y. (1967)- The fungi of wheat straw compost. II- Biochemical and physiological studies. Transations of British Mycology Society, 50(4), 667-677.

Christensen, C.M.; H.H. Kaufmann (1969)- Grain storage. The role of fungi in quality loss. University of Minnesota Press. Minneapolis.

- Ciavatta, C.; M. Govi; L. Pasotti; P. Sequi (1993)- Changes in organic matter during stabilization of compost from municipal solid wastes. Bioresource Technology, 43, 141-145.
- Clark, C.S.; C.O.Buckingham; R.Charbonneau; R.H. Clark (1977)- Laboratory scale composting : techniques. Journal of Environmental Engineering Division, October, 893-906.
- Clark, C.S.; C.O.Buckingham; R.Charbonneau; R.H. Clark (1978)- Laboratory scale composting : studies. Journal of Environmental Engineering Division, February, 47-59.
- Clemente, A. (1983)- Casca de arroz: um desperdício a valorizar biotecnologicamente. Monografia/Concurso para investigador auxiliar. LNETI.
- Crawford, S.L.; G.E. Johnson; F.E. Goetz, (1993)- The potential for bioremediation of soils containing PAHs by composting. Compost Science & Utilization, 1(3), 41-47.
- Das, K.; H.M. Keener (1996)- Process control based on dynamic properties in composting: moisture and compaction considerations. The science of composting International symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Deobald, H.J. (1972)- Rice flours. Rice chemistry and technology. Vol. IV. Edited by D.F. Houston. Monograph series. American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota.
- Derikx, P.J.L.; H.J.M. Op Den Camp; C. Van Der Drift; L.J.L.D. Van Griensven; G.D. Vogels (1990)- Biomass and biological activity during the production of compost used as a substrate in mushroom cultivation. Applied and Environmental Microbiology, 56(10), 3029-3034.
- Diaz-Raviña, M.; M.J. Acea; T. Carballas (1989)- Microbiological characterization of four composted urban refuses. Biological Wastes, 30, 89-100.
- Domsch; K.H.; W. Gams; T.H. Anderson (1980)- Compendium of soil fungi. Academic Press.

Referências Bibliográficas

Elwell, D.L.; H.M. Keener; H.A.J. Hoitink; R.C. Hansen; J. Hoff (1994)- Pilot and full scale evaluations of leaves as an amendment in sewage sludge composting. Compost Science & Utilization, 2(2), 55-73.

EPA (s.d.)- Composting yard and municipal solid waste. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response. Technomic Publishing Company Inc., Pennsylvania.

Epstein, E. (1993)- Neighborhood and worker protection for composting facilities: issues and actions. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.

Farrell, J.B. (1993)- Fecal pathogen control during composting. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.

Finstein, M.S.; L.M. Morris (1975)- Microbiology of solid waste composting. Advance Applied Microbiology (Academic Press), 19, 113-151.

Finstein, M.S.; J. Cirello; D.J. Suler; M.L. Morris; P.F. Strom (1980)- Microbial ecosystems responsible for anaerobic digestion and composting. Journal of Water Pollution Control Federation, 52(11), 2675-2685.

Finstein, M.S. (1980)- Composting microbial ecosystem: implications for process design and control. BioCycle, July/August, 25-27.

Finstein, M.S.; F.C. Miller; P.F. Strom; S.T. MacGregor; K.M. Psarianos (1983a)- Composting ecosystem management for waste treatment. Biotechnology, 1, 347-353.

Finstein, M. S.; F.C. Miller; P.F. Strom (1983b)- Evaluation of composting process performance. Proceedings of the international conference on Composting of solid wastes and slurries. Edited by Edward I. Stentiford. Department of Civil Engineering, The University of Leeds, Leeds, England.

Finstein, M.S.; F.C. Miller; P.F. Strom (1986a)- Waste treatment as a controlled system. Biotechnology. Vol. 8. Edited by H.J. Rehm and G. Reed. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.

Finstein, M. S.; F.C. Miller; P.F. Strom (1986b)- Monitoring and evaluating composting process performance. Journal of Water Pollution Control Federation, 58, 4, 272-278.

Finstein, M.S. (1992)- Composting in the context of municipal solid waste management in environmental microbiology. Environmental Microbiology. Edited by R. Mitchell. John Wiley & Sons, Wiley Liss Division, New York.

Finstein, M.S.; J.A. Hogan (1993)- Integration of composting process microbiology facility structure and decision-making. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.

Fisher, K. (1996)- Environmental impact of composting plants. The science of composting International symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Fogarty, A.M.; O.H. Tuovinen (1991)- Microbiological degradation of pesticides in yard waste composting. Microbiological Reviews, 55(2), 225-233.

Frankland, J.C. (1992)- Mechanisms in fungal succession. The fungal community: its organization and role in the ecosystem. Second edition. Edited by G.C. Carroll and D.T. Wicklow. Marcel Dekker Inc., New York.

Garcia, C.; T. Hernández; F. Costa; B. Ceccanti; C. Ciardi (1992)- Changes in ATP content, enzyme activity and inorganic nitrogen species during composting of organic wastes. Canadian Journal of Soil Science, 72(August), 243-253.

Garland, J.L.; A.L. Mills (1991)- Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level-sole-carbon-source utilization. Applied and Environmental Microbiology, 57(8), 2351-2359.

Referências Bibliográficas

Gibson, A.M.; N. Bratchell; T.A. Roberts (1987)- The effect of sodium chloride and temperature on the rate and extent of growth of *Clostridium botulinum* type A in pasteurized pork slurry. Journal of Applied Bacteriology, 62, 479-490.

Golueke, C.G. (1977)- Biological reclamation of solid wastes. Rodale Press, Emmaus, PA, USA.

Golueke, C.G. (1981)- Principles of biological resource recovery. BioCycle, July/August, 36-40.

Golueke, C.G. (1982)- When is compost safe?. BioCycle, March/April, 28-38.

Golueke, C.G. (1992)- Bacteriology of composting. BioCycle, January, 55-57.

Gotaas, H.B. (1959)- Compostage et assainissement. OMS, Genève.

Gray, K.R.; K. Sherman; A.J. Biddlestone (1971)- Review of composting. Part 2- The practical process. Process Biochemistry, 6, October, 22-27.

Greer, C.W.; J. Hawari; R. Samson (1990)- Influence of environmental factors on 2,4-dichlorophenoxyacetic acid degradation by *Pseudomonas cepacia* isolated from peat. Archives of Microbiology, 154, 317-322.

Haack, S.K.; H. Garchow; M.J. Klug; L.J. Forney (1995)- Analysis of factors affecting the accuracy, reproducibility, and interpretation of microbial community carbon source utilization patterns. Applied and Environmental Microbiology, 61(4), 1458-1468.

Hall, J.; A. Zmyslowska; J. Stefanicki; K. Murray (1993)- Co-composting MSW and sludge in Warsaw. BioCycle, June, 46-50.

Hamelers, H.V.M. (1993)- A theoretical model of composting kinetics. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.

Hamelers, H.V.M. (1995)- comunicação pessoal.

Harper, E.; F.C. Miller; B.J. Macauley (1992)- Physical management and interpretation of an environmentally controlled composting ecosystem. Australian Journal of Experimental Agriculture, 32, 657-667.

Haug, R.T.; L.A. Haug (1977)- Sludge composting: a discussion of engineering principles. Part I. Compost Science, November/December, 6-11.

Haug, R.T.; L.A. Haug (1978)- Sludge composting: a discussion of engineering principles. Part II. Compost Science, January/February, 10-14.

Haug, R.T. (1980)- Compost engineering- principles and practice. Ann Arbor Science, Michigan.

Haug, R.T.; L.D. Tortorici (1986)- Composting process design criteria. Part IV- Case study. BioCycle, November/December, 34-39.

Haug, R.T. (1986a)- Composting process design criteria. Part I- Feed conditioning. BioCycle, August, 38-43.

Haug, R.T. (1986b)- Composting process design criteria. Part II- Detention time. BioCycle, September, 36-39.

Haug, R.T. (1986c)- Composting process design criteria. Part III- Aeration. BioCycle, October, 53-57.

Haug, R.T.; W.F. Ellsworth (1991)- Measuring compost substrate degradability. BioCycle, 32(1), 56-60.

Haug, R.T. (1993)- The practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Haug, R.T. (1996)- Composting plant design and process management. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Hesseltine, C.W.; J.J. Ellis (1973)- Mucorales. The fungi- an advanced treatise A taxonomic review with keys- Basidiomycetes and lower fungi. Vol. IVB. Edited by G. C. Ainsworth, F. K. Sparrow, A. S. Sussman. Academic Press, New York and London.

Referências Bibliográficas

Hogan, J.A. (1989)- Physical modeling of the composting ecosystem. Master of Science thesis. The State University of New Jersey, Rutgers.

Hogan, J.A.; F.C. Miller; M.S. Finstein (1989)- Physical modeling of the composting ecosystem. Applied and Environmental Microbiology, 55(5), 1082-1092.

Hoitink, H.A.J.; M.J. Boehm; Y. Hadar (1993)- Mechanisms of suppression of soilborne plant pathogens in compost amended substrates. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.

Hoitink, H.A.J.; M.E. Grebus (1994)- Status of biological control of plant diseases with composts. Compost Science & Utilization, 2(2), 6-12.

Hoitink, H.A.J.; A.G. Stone; M.E. Grebus (1995)- Mechanisms of supression of plant diseases with composts. First international symposium on biological waste mangement "a wasted chance ?". Organized by W. Bidlingmaier- University of Essen and R. Stegmann- Technical University of Hamburg. 4-6 April, Harburg.

Houston, D.F. (1972)- Rice hulls. Rice chemistry and technology. Vol. IV. Edited by D.F. Houston. Monograph series. American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota.

Ingold, C.T. (1973)- The biology of fungi. Hutchinson & Co Publishers Ltd, London.

Insam H.; K. Amor; M. Renner; C. Crepaz (1996a)- Changes in microbial functional diversity during composting of manure. (Poster). The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Insam H.; K. Amor; M. Renner; C. Crepaz (1996b)- Changes in functional abilities of the microbial community during composting of manure. Microbial Ecology, 31, 77-87.

Iwai, S.; T. Ktao (1994)- Wastewater treatment with microbial films. Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, Basel.

Jackson, M.J.; M.A. Line (1997)- Windrow composting of a pulp and paper mill sludge: process performance and assessment of product quality. Compost Science & Utilization, 5(3), 6-14.

Jeris, J.S.; Regan, R.W. (1973a)- Controlling environmental parameters for optimum composting. I- Experimental procedures and temperature. Compost Science, January/February, 10-15.

Jeris, J.S.; Regan, R.W. (1973b)- Controlling environmental parameters for optimum composting. II- Moisture, free air space and recycle. Compost Science, March/April, 8-14.

Jeris, J.S.; Regan, R.W. (1973c)- Controlling environmental parameters for optimum composting. III- pH, nutrients, storage and paper content. Compost Science, May/June, 16-21.

Kaiser, J. (1996)- Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach. Ecological Modelling, 91, 25-37.

Kayhanian, M.; G. Tchobanoglous (1992)- Computation of C/N ratios for various organic fractions. BioCycle, 33(5), 58-60.

Keener, H.M.; C. Marugg; R.C. Hansen; H.A.J. Hoitink (1993)- Optimizing the efficiency of the composting process. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.

Keener, H.M.; D.L. Elwell; K.C. DAS; R.C. Hansen (1996)- Minimizing the cost of compost production through facility design and process control. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Kjoller, A.; S. Struwe (1992)- Functional groups of microfungi in decomposition. The fungal community: its organization and role in the ecosystem. Second edition. Edited by G.C. Carroll and D.T. Wicklow. Marcel Dekker Inc., New York.

Kubocz, T.; C.E. Gruneklee (1995)- Succession of some microbial groups in a technical composting process. ORCA Technical Document nr. 5- "The challenge-

Referências Bibliográficas

fitting composting and anaerobic digestion into integrated waste management". Proceedings of the Orca Congress, Brussels, Belgium.

Kubota, H.; K. Nakasaki (1991)- Accelerated thermophilic composting of garbage. BioCycle, June, 66-68.

Kuter, G.A.; H.A.J. Hoitink; L.A. Rossman (1985)- Effects of aeration and temperature on composting of municipal sludge in a full-scale vessel system. Journal of Water Pollution Control Federation, 57(4), 309-315.

Lasaridi, K.E.; E.K. Papadimitriou; C. Balis (1996)- Development and demonstration of a thermogradient respirometer. Compost Science & Utilization, 4(3), 53-61.

Lasaridi, K.E.; E.I. Stentiford (1996)- Respirometric techniques in the context of compost stability assessment: principles and practice. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Lemmes, B. (1996)- Composting as an integrated system of waste management. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Leton, T.G.; E.I. Stentiford (1990)- Control of aeration in static pile composting. Waste Management & Research, 8, 299-306.

Lilya, R.; J. Uotila; H. Silvennoinen (1996)- Bioremediation of PAH-contaminated soil. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Liu, X.; M.A. Cole (1996)- Minimum effective compost addition for remediation of pesticide- contaminated soil. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Lobato, A.F.; A.T. Chinista; F. Ferreira; M. Presumido; M.M. Inácio; P. Gama (1997)- Plano estratégico dos resíduos sólidos urbanos. Ministério do Ambiente. Lisboa.

Lomax, K.M.; N.E. Collins; C.M. Denny (1984)- Simulating mushroom compost heat production. BioCycle, 25(3), 38-40.

- Lynch, J.M. (1993)- Substrate availability in the production of composts. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.
- MacGregor, S. T.; F.C. Miller; K.M. Psarianos; M.S. Finstein (1981)- Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. Applied and Environmental Microbiology, 41(6), 1321-1330.
- Magnuson, J.A.; A.D. King; T. Torok (1990)- Microflora of partially processed lettuce. Applied and Environmental Microbiology, 56(12), 3851-3854.
- Martins, I. Spencer (1983)- Bioconversão de amido pela levedura *Lipomyces Kononenkoae*. Aspectos enzimológicos e fisiológicos. Dissertação de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Marugg, C.; M. Grebus; R.C. Hansen; H.M. Keener; H.A.J. Hoitink (1993)- A kinetic model of yard waste composting process. Compost Science & Utilization, Premier issue, 38-51.
- McKinley, V.L.; J.R. Vestal (1984)- Biokinetic analyses of adaptation and succession: microbial activity in composting municipal sewage sludge. Applied and Environmental Microbiology, 47(5), 933-941.
- McKinley, V.L.; J.R. Vestal (1985)- Physical and chemical correlates of microbial activity and biomass in composting municipal sewage sludge. Applied and Environmental Microbiology, 50(6), 1395-1403.
- McKinley, V.L.; J.R. Vestal; A.E. Erarp (1985a)- Microbial activity in composting. Part I. BioCycle, September, 39-43.
- McKinley, V.L.; J.R. Vestal; A.E. Erarp (1985b)- Microbial activity in composting. Part II. BioCycle, October, 47-50.
- Meckes, M.C.; E.W. Rice; C.H. Johnson; S. Rock (1995)- Assessment of the bacteriological quality of compost from a yard waste processing facility. Compost Science & Utilization, 3(3), 6-13.

Referências Bibliográficas

Mendenhall, W.; T. Sincich (1992)- Statistics for engineering and the sciences. Third edition. Dellen Publishing Company, San Francisco.

Microsoft Excel (1992)- versão 5.0. Microsoft Corp., Redmond, WA.

Miller, F.C.; M.S. Finstein (1985)- Materials balance in composting of wastewater sludge as affected by process control strategy. Journal of Water Pollution Control Federation, 57(2), 122-127.

Miller, F.C. (1989)- Matric water potencial as an ecological determinant in compost, a substrate dense system. Microbial Ecology, 18, 59-71.

Miller, F.C.; E.R. Harper; B.J. Macauley; A. Gulliver (1990)- Composting based on moderately thermophilic and aerobic conditions for the production of commercial mushroom growing compost. Australian Journal of Experimental Agriculture, 30, 287-296.

Miller, F.C. (1991)- Biodegradation of solid wastes by composting. Biological degradation of wastes. Edited by A. M. Martin. Elsevier Applied Science, London, New York.

Miller, F.C. (1992)- Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. Soil microbial ecology- applications in agricultural and environmental management. Edited by F. Blaine Metting. Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hong Kong.

Miller, F.C. (1996)- Heat evolution during composting of sewage sludge. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Millner, P.D.; S.A. Olenchock; E. Epstein; R. Rylander; M.D.J. Haines; J. Walker; B.L. Ooi; E. Horne; M. Maritato (1994)- Bioaerosols associated with composting facilities. Compost Science & Utilization, 2(4), 6-57.

Molard, D.R. (1982)- Caractères généraux de la microflore des grains et graines et principales altérations qui en résultent. Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés. Vol. 1. J.L. Multon. Technique & Documentation, Lavoisier.

Moorhead, D.L.; J.F. Reynolds (1992)- Modeling the contributions of decomposer fungi in nutrient cycling. The fungal community: its organization and role in the ecosystem. Second edition. Edited by G.C. Carroll and D.T. Wicklow. Marcel Dekker Inc., New York.

Moreau, C. (1974)- Moissures toxiques dans l'alimentation. Deuxième édition. Masson et Cie, Éditeurs, Paris.

Nakasaki, K.; M. Sasaki; M. Shoda; H. Kubota (1985a)- Change in microbial numbers during thermophilic composting of sewage sludge with reference to CO₂ evolution rate. Applied and Environmental Microbiology, 49(1), 37-4.

Nakasaki, K.; M. Shoda; H. Kubota (1985b)- Comparison of composting of two sewage sludges. Journal of Fermentation Technology, 63(6), 537-543.

Nakasaki, K.; M. Sasaki; M. Shoda; H. Kubota (1985c)- Effect of seeding during thermophilic composting of sewage sludge. Applied and Environmental Microbiology, 49(3), 724-726.

Nakasaki, K.; M. Sasaki; M. Shoda; H. Kubota (1985d)- Characteristics of mesophilic bacteria isolated during thermophilic composting of sewage sludge. Applied and Environmental Microbiology, 49(1), 42-45.

Nakasaki, K.; M. Shoda; H. Kubota (1986)- Effects of a bulking agent on the reaction rate of thermophilic sewage sludge composting. Journal of Fermentation Technology, 64(6), 539-544.

Nakasaki, K.; Y. Nakano; T. Akiyama; M. Shoda; H. kubota (1987a)- Oxygen diffusion and microbial activity in composting of dehydrated sewage sludge cakes. Journal of Fermentation Technology, 65(1), 43-48.

Nakasaki, K.; J. Kato; T. Akiyama; H. Kubota (1987b)- A new composting model and assessment of optimum operation for effective drying of composting material. Journal of Fermentation Technology, 65(4), 441-447.

Nakasaki, K.; T. Akiyama (1988)- Effects of seeding on thermophilic composting of household organic waste. Journal of Fermentation Technology, 66(1), 37-42.

Nakasaki, K.; A. Watanabe; H. Kubota (1992a)- Effects of oxygen concentration on composting organics. BioCycle, June, 52-54.

Referências Bibliográficas

Nakasaki, K.; A. Watanabe; M. Kitano; H. Kubota (1992b)- Effect of seeding on thermophilic composting of tofu refuse. Environmental Quality, 21, 715-719.

Nakasaki, K.; S. Fujiwara; H. Kubota (1994)- A newly isolated thermophilic bacterium, *Bacillus Licheniformis* HA1 to accelerate the organic matter decomposition in high rate composting. Compost Science & Utilization, 2(2), 88-96.

Namkoong, W.; E.Y. Hwang (1997)- An experimental study on night soil composting in Korea. Compost Science & Utilization, 5(4), 46-51.

Newell, S.Y. (1992)- Estimating fungal biomass and productivity in decomposing litter. The fungal community: its organization and role in the ecosystem. Second edition. Edited by G.C. Carroll and D.T. Wicklow. Marcel Dekker Inc., New York.

Noble, R.N.; T.R. Fermor; C.E. Evered; P.T. Atkey (1997)- Bench-scale preparation of mushroom substrates in controlled environments. Compost Science & Utilization, 5(3), 32-43.

Nout, M.J.R. (1992)- Ecological aspects of mixed-culture food fermentations. The fungal community: its organization and role in the ecosystem. Second edition. Edited by G.C. Carroll and D.T. Wicklow. Marcel Dekker Inc., New York.

NP 875 (1983)- Alimentos para animais. Determinação do teor de humidade. IPQ.

NP 2078 (1985)- Cereais, leguminosas e produtos derivados. Contagem de bolores e leveduras. IPQ.

NP 2026 (1987)- Alimentos para animais. Determinação do teor de amido. IPQ.

NP 876 (1988)- Alimentos para animais. Determinação do teor de matéria gorda. IPQ.

NP 2030 (1996)- Alimentos para animais. Determinação do teor de proteína bruta. IPQ.

Onions, A.H.S.; D. Allsopp; H.O.W. Eggins (1981)- Smith's introduction to industrial mycology. Seventh edition. Edward Arnold Publishers Ltd, London.

Oorthuys, F.M.L.J.; H. Von Deylen; P.C. Lokin (1995)- Engineering, construction, and first operational experiences of the 25,000 tpa tunnel composting plant in Groningen. First international symposium on biological waste mangement "a wasted chance ?". Organized by W. Bidlingmaier- University of Essen and R. Stegmann- Technical University of Hamburg. 4-6 April, Harburg.

Papadimitriou, E.K.; C. Balis (1996)- Comparative study of parameters to evaluate and monitoring the rate of a composting process. Compost Science & Utilization, 4(4), 52-61.

Parkinson, D.; D.C. Coleman (1991)- Microbial communities, activity and biomass. Agriculture, Ecosystems and Environment, 34, 3-33.

Pelhate, J. (1982a)- Ecologie de la microflore des grains et graines. Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés. Vol. 1. J.L. Multon. Technique & Documentation, Lavoisier.

Pelhate, J. (1982b)- Microbiologie des grains humides (y compris cribs et ensilage). Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés. Vol. 1. J.L. Multon. Technique & Documentation, Lavoisier.

Petruzzelli, G.A. (1996)- Heavy metals in compost and their effect on soil quality. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Pfaller, S.L.; S.J. Vesper; H. Moreno (1994)- The use of PCR to detect a pathogen in compost. Compost Science & Utilization, 2(2), 48-54.

Piavaux, A. (1995)- New trends in waste management of the European Union. ORCA Technical Document nr. 5- "The challenge- fitting composting and anaerobic digestion into integrated waste management". Proceedings of the Orca Congress, Brussels, Belgium.

Pitter, P.; J. Chudoba (1990)- Biodegradability of organic substances in the aquatic environment. CRC Press, Boca Raton, Florida.

Press, C.M.; W.F. Mahaffee; J.H. Edwards; J.W. Kloepper (1996)- Organic by-product effects on soil chemical properties and microbial communities. Compost Science & Utilization, 4(2), 70-80.

Raninger, B. (1995)- Composting and compost quality in Aústria. First international symposium on biological waste mangement "a wasted chance ?". Organized by W. Bidlingmaier- University of Essen and R. Stegmann- Technical University of Hamburg. 4-6 April, Harburg.

Razvi, A.S.; D.W. Kramer (1996)- Evaluation of compost activators for composting grass clippings. Compost Science & Utilization, 4(4), 72-80.

Reed, D.D. (1997)- Ecophysiological models of forest growth: uses and limitations. Workshop on "Empirical and process-based models for forest an stand growth simulation". Instituto Superior de Agronomia and INFRO 4.01. September 1997, Oeiras.

Riffaldi, R.; R. Levi-Minzi; A. Saviozzi; M. Capurro (1992)- Evaluating garbage compost. Part I. BioCycle, 33(1), 66-69.

Robinson, J.J.; E.I. Stentiford (1993)- Improving the aerated static pile composting method by the incorporation of moisture control. Compost Science & Utilization, 1(1), 52-68.

Ryse, G.V.; L. Vanacker (1995)- Integrated quality control basics for compost sales. First international symposium on biological waste mangement "a wasted chance ?". Organized by W. Bidlingmaier- University of Essen and R. Stegmann- Technical University of Hamburg. 4-6 April, Harburg.

Schroeder, H.W.; D.L. Calderwood (1972)- Rough rice storage. Rice chemistry and technology. Vol. IV. Edited by D.F. Houston. Monograph series. American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota.

Schulze, K.L. (1962)- Continuous thermophilic composting. Compost Science, Spring, 22-34.

Shaw, C.M.; E.I. Stentiford (1996)- Heat transfer in composting systems. (Poster). The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Sikora, J.L.; M.A. Ramirez; T.A. Troeschel (1983)- Laboratory composter for simulation studies. Journal of Environmental Quality, 12(2), 219-224.

Silveira, A.I.E. (1987)- Contribuição para o estudo da influência da relação carbono/azoto no processo de compostagem de resíduos sólidos. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Silveira, A.E.; R.B. Ganho (1995)- Composting wastes contaminated with naphthalene. Compost Science & Utilization, 3(4), 78-81.

Sopper, W.E.; E.M. Seaker (1987)- Sludge brings life to microbial communities. BioCycle, October, 40-47.

SPSS (1993)- SPSS Base System Syntax Reference Guide, versão 6.0.

Stentiford, E.I.; J.T. Pereira Neto (1985)- Simplified systems for refuse/sludge composts. BioCycle, 26(5), 46-49.

Stentiford, E.I. (1993)- Diversity of composting systems. Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Edited by Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. The Ohio State University. Renaissance Publications, Ohio. Proceeding of an international composting research symposium, March 27-29, 1992, Ohio.

Stentiford, E.I.; Zane, B. (1995)- Measuring and controlling moisture in composting systems. First international symposium on biological waste management "a wasted chance ?". Organized by W. Bidlingmaier- University of Essen and R. Stegmann- Technical University of Hamburg. 4-6 April, Harburg.

Stentiford, E.I. (1996)- Composting control: principles and practice. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Straatsma, G.; R.A. Samson; T.W. Olijnsma; H.J.M. Op Den Camp; J.P.G. Gerrits; L.J.L.D. Van Griensven (1994)- Ecology of thermophilic fungi in mushroom compost, with emphasis on *Scytalidium thermophilum* and growth stimulation of *Agaricus bisporus* mycelium. Applied and Environmental Microbiology, 60(2), 454-458.

Strauch, D. (1996)- Occurrence of microorganisms pathogenic for man and animals in source-separated biowaste and compost: importance, control, limits, epidemiology. The science of composting international symposium. Edited by M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi. Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Referências Bibliográficas

Strom, P. F.; Miller, F. C.; Finstein, M. S. (1983)- Problem of scale in composting research. Proceedings of the international conference on Composting of solid wastes and slurries. Edited by Edward I. Stentiford. Department of Civil Engineering, The University of Leeds, Leeds, England.

Strom, P.F. (1985a)- Identification of thermophilic bacteria in solid waste composting. Applied and Environmental Microbiology, 50(4), 906-913.

Strom, P.F. (1985b)- Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting. Applied and Environmental Microbiology, 50(4), 899-905.

Suler, D.J.; M.S. Finstein (1977)- Effect of temperature, aeration, and moisture on CO₂ formation in bench-scale, continuously thermophilic composting of solid waste. Applied and Environmental Microbiology, 33(2), 345-350.

Swannell, R.P.J.; M. Scholes (1991)- The use of microcosms to study the composting of municipal solid waste. (Laboratory report). Warren Spring Laboratory, Stevenage, England.

Troussellier, M.; P. Legendre (1981)- A functional evenness index. Microbial Ecology, 9, 155-169.

Tseng, D.Y.; J.J. Chalmers; O.H. Tuovinen (1996)- ATP measurement in compost. Compost Science & Utilization, 4(3), 6-17.

Ueda, S. (1988)- Glucoamylase. Handbook of amylases and related enzymes. Their sources, isolation methods, properties and applications. Edited by The Amylase Research Society of Japan. Pergamon Press.

United Nations Industrial Development Organization (1985)- Rice bran- an under-utilized raw material. United Nations Publications, New York.

Vogtmann, H.; K. Fricke; W. Fuchshofen; R. Gottschall (1995)- The role of biogenic waste compost in horticulture and agriculture. ORCA Technical Document nr. 5- "The challenge- fitting composting and anaerobic digestion into integrated waste management". Proceedings of the Orca Congress, Brussels, Belgium.

Waksman, A.S.; W.W. Umbreit; T.C. Cordon (1939a)- Thermophilic actinomycetes and fungi in soils and in composts. Soil Science, 47, 37-61.

Waksman, A.S.; T.C. Cordon; N. Hulpoi (1939b)- Influence of temperature upon the microbiological population and decomposition processes in composts of stable manure. Soil Science, 47, 83-113..

Walker, I.K.; W.J. Harrison (1960)- The self-heating of wet wool. New Zealand Journal of Agricultural Research, 3(6), 861-895.

Wanner, J. (1994)- Activated sludge population dynamics. Water Science and Technology, 30(11), 159-169.

Whang, D.S.; G.F. Meenaghan (1980)- Kinetic model of composting process. Compost Science /Land Utilization, May/June, 44-46.

Wiegant, W.M. (1992)- Growth characteristics of the thermophilic fungus *Scytalidium thermophilum* in relation to production of mushroom compost. Applied and Environmental Microbiology, 58(4), 1301-1307.

Wylen, G.J.; R.E. Sonntag (1985)- Fundamentals of classical thermodynamics. Third edition. SI Version, Wiley, New York.

Zucconi, F.; M. de Bertoldi (1987)- Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. Compost: production, quality and use. Edited by M. de Bertoldi, M.P. Ferranti, P.L. L'Hermite, F. Zucconi. Elsevier, London.

Zwietering, M.H.; I. Jongenburger; F.M. Rombouts; K. Van Triet (1990)- Modeling of the bacterial growth curve. Applied and Environmental Microbiology, 56(6), 1875-1881.

ANEXOS

1- Síntese da formulação matemática do modelo CPK (Hamelers,1993)

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = r_{S_m} + D_{S_m} \frac{\partial^2 S_m}{\partial x^2} - S_m \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial O_2}{\partial t} = r_{O_2} + D_{O_2} \frac{\partial^2 O_2}{\partial x^2} - O_2 \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial S_p}{\partial t} = r_{S_p} - S_p \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial X_m}{\partial t} = r_{X_m} - X_m \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{r_{X_m}}{\rho_{X_m}} + \frac{r_{S_p}}{\rho_{S_p}} + \frac{r_w}{\rho_w}$$

$$W = \frac{\left(1 - \frac{X_m}{\rho_{X_m}} - \frac{S_p}{\rho_{S_p}} \right)}{\rho_w}$$

onde:

S_m - substrato monomérico (concentração)

S_p - substrato polimérico (concentração)

X_m - biomassa (concentração)

O_2 - oxigénio (concentração)

W - água (concentração)

V - volume livre

D_i - coeficiente de difusão da espécie i

ρ_i - massa específica da espécie i

r_i - taxa de conversão da espécie i por unidade de volume

2- Síntese da formulação matemática do modelo de compostagem desenvolvido por Kaiser (1996)

$$\frac{dm_{CO_2}}{dt} = \frac{dm_{CO_2}^{bio}}{dt} - m_{CO_2} \frac{dV_{sd}}{dt} / V$$

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = \frac{dm_{H_2O}^{bio}}{dt} + \frac{dm_{H_2O}^{entr}}{dt} - \frac{dm_{H_2O}^{sd}}{dt}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{bio}}{dt} - \frac{dQ_{amb}}{dt} + \frac{dQ_{entr}}{dt} - \frac{dQ_{sd}}{dt}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} / (C_r + C_{mat} + C_{ar})$$

$$\frac{dx_i}{dt} = \mu_i x_i$$

$$\mu_i = \mu_{max,j} f_{temp} \frac{S_j}{K_{s,j} + S_j} - \delta$$

onde:

$$S_1 = s_1 \quad S_2 = s_1 + s_2 \quad S_3 = S_4 = s_1 + s_2 + s_3$$

$$\frac{ds_1}{dt} = -\frac{1}{Y} \left(\frac{dx_1}{dt} + \frac{s_1}{s_1 + s_2} \frac{dx_2}{dt} + \frac{s_1}{s_1 + s_2 + s_3} \frac{dx_3}{dt} + \frac{s_1}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \frac{dx_4}{dt} \right)$$

.....

$$\frac{ds_3}{dt} = -\frac{1}{Y} \left(\frac{s_3}{s_1 + s_2 + s_3} \frac{dx_3}{dt} + \frac{s_4}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \frac{dx_4}{dt} \right)$$

$$\frac{ds_4}{dt} = -\frac{1}{Y} \left(\frac{s_4}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \frac{dx_4}{dt} \right)$$

$$\frac{dm_{CO_2}^{bio}}{dt} = c_c \frac{PM_{CO_2}}{PM_c} (Y - 1) \left(\frac{ds_1}{dt} + \frac{ds_2}{dt} + \frac{ds_3}{dt} + \frac{ds_4}{dt} \right) M$$

$$M = \sum m_i + \sum m_j + m_{húmica} + m_{mineral} + m_{H_2O}$$

onde:

m - massa

Q - quantidade de calor

V - volume livre no substrato

T - temperatura

bio - produção metabólica

$entr$ - entrada

sd - saída

amb - ambiente

C_r - capacidade calorífica do reactor

C_{mat} - capacidade calorífica do substrato

C_{ar} - capacidade calorífica do ar

μ_i - taxa específica de crescimento do microrganismo i

f_i^{temp} - coeficiente de dependência do crescimento do microrganismo i da temperatura

S_j - concentração total dos substratos referentes ao organismo i

K_{sj} - constante de saturação do microrganismo i

δ - taxa de morte

x_i - concentração do microrganismo i

i - microrganismo ($i=1$ =bactérias, $i=2$ =actinomicetes, $i=3$ =fungos "castanhos", $i=4$ =fungos "brancos")

S_j - concentração do substrato j

j - substrato ($j=1$ =glúcidos simples e amido, $j=2$ =hemicelulose, $j=3$ =celulose, $j=4$ =lenhina)

Y - coeficiente de rendimento

c_c - concentração de carbono do substrato

PM - peso molecular

M - massa do substrato em compostagem

c - carbono

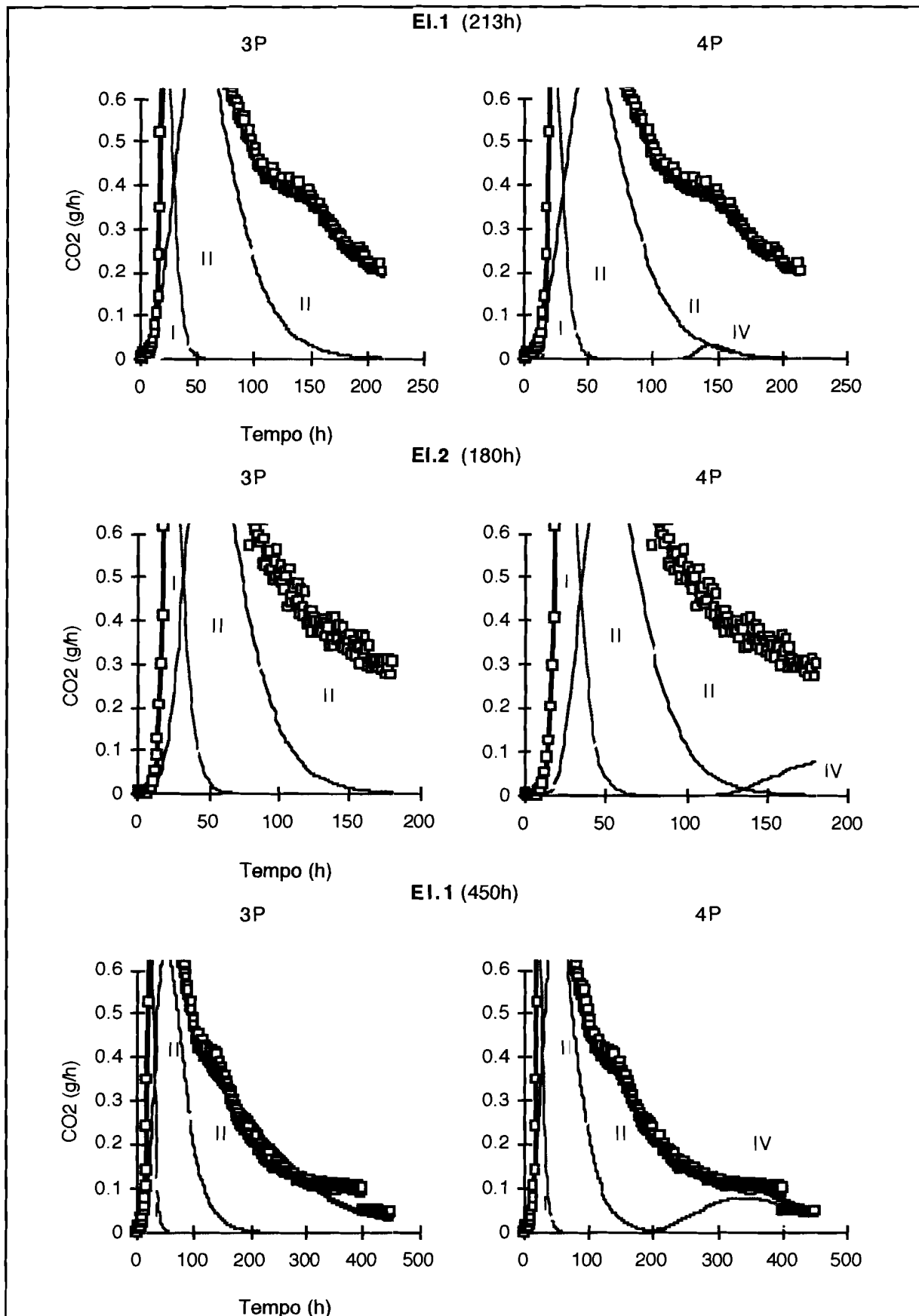


Figura A.I.1- Modelo cinético de compostagem (ensaio a 25°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

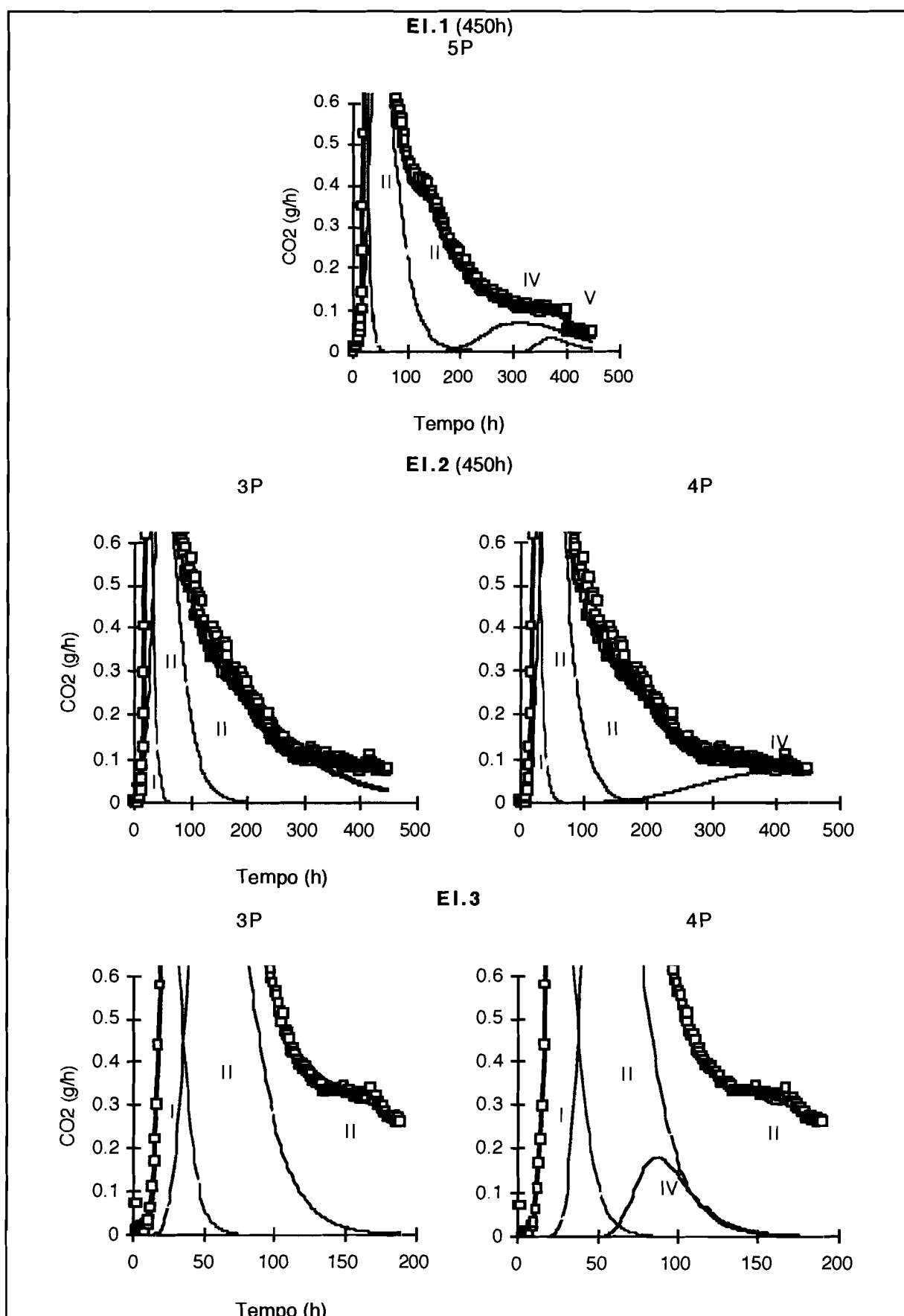


Figura A.I.1- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

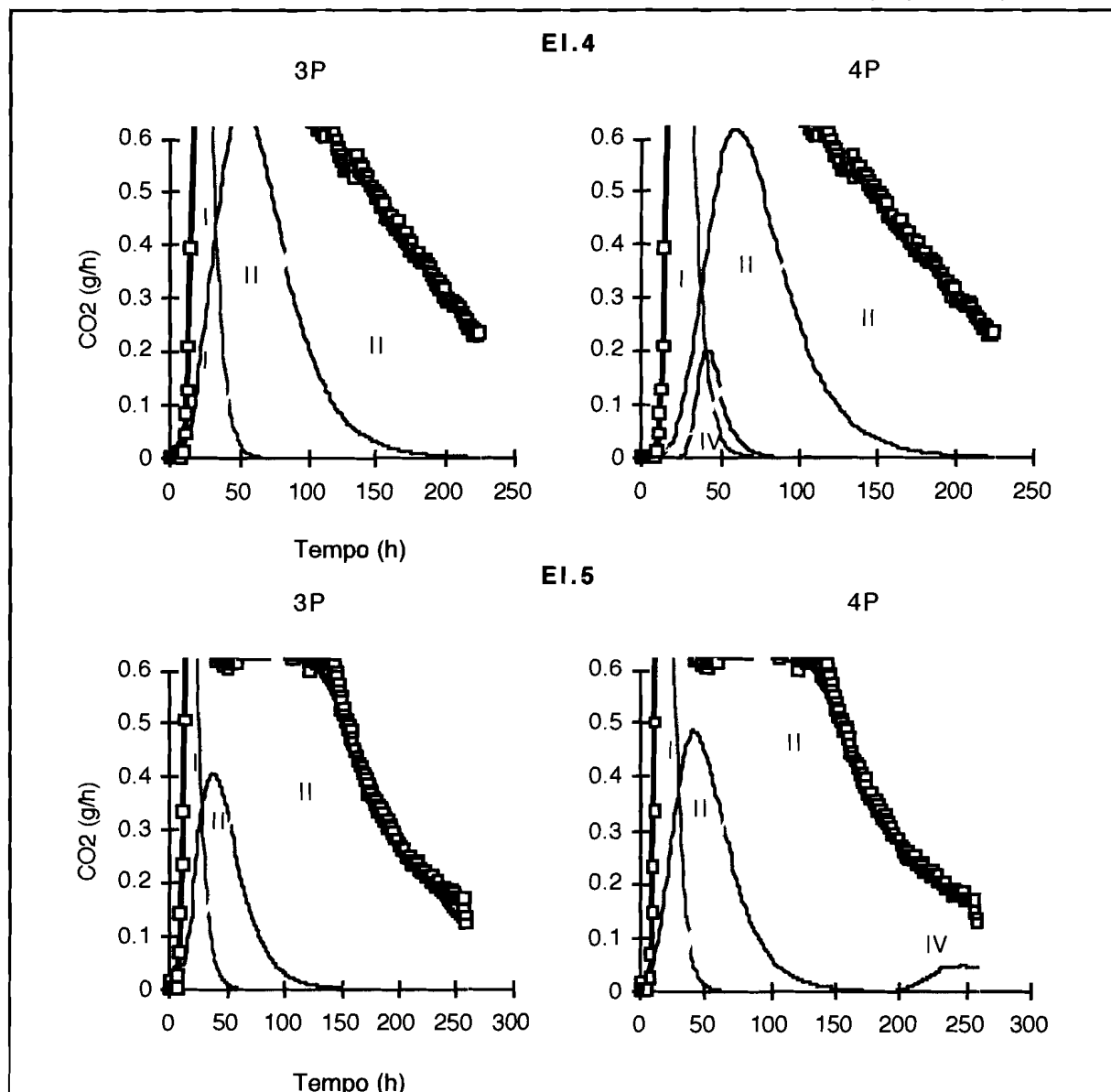


Figura A.I.1- Modelo cinético de compostagem (ensaio a 25°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

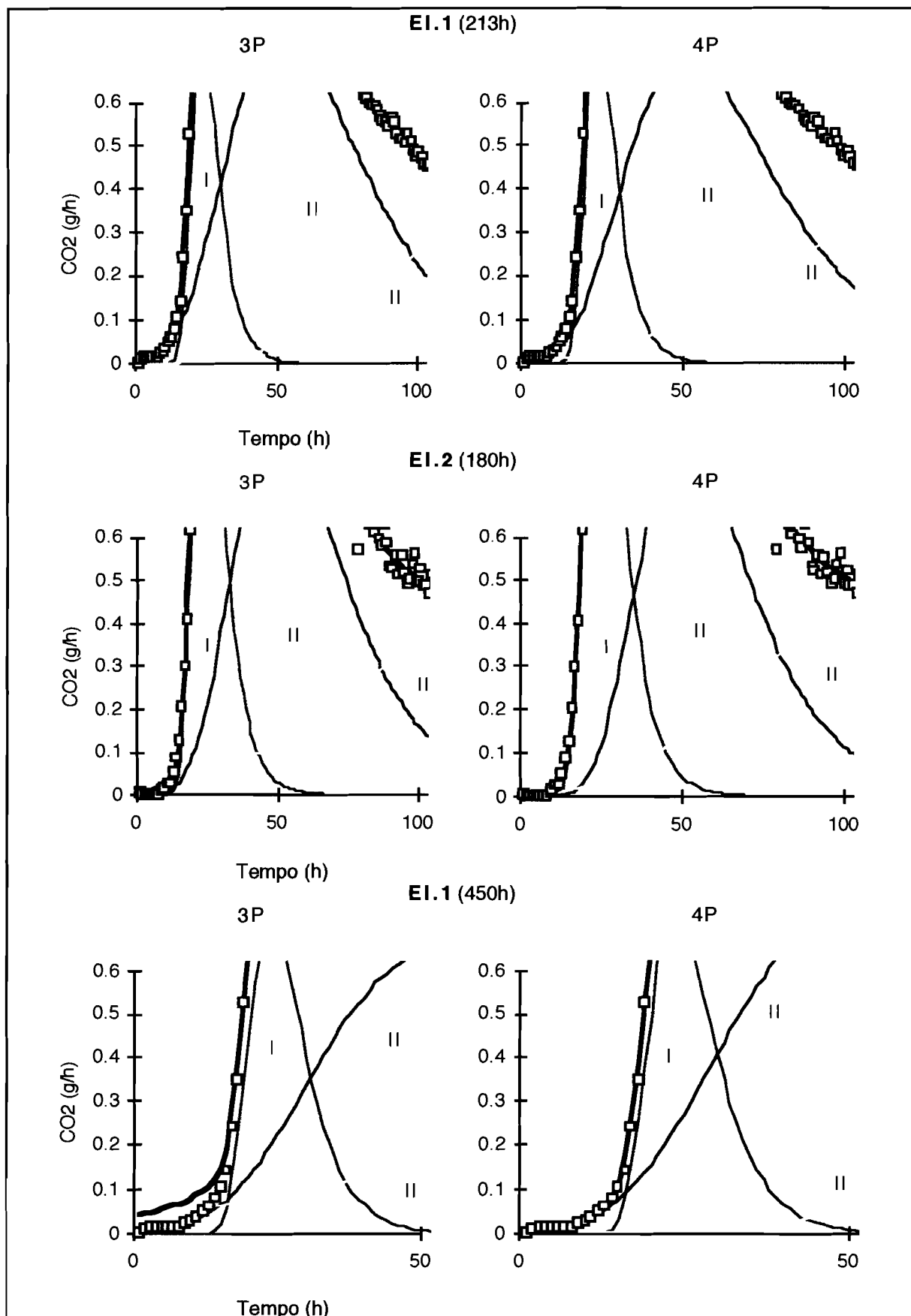


Figura A.I.2- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios^(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

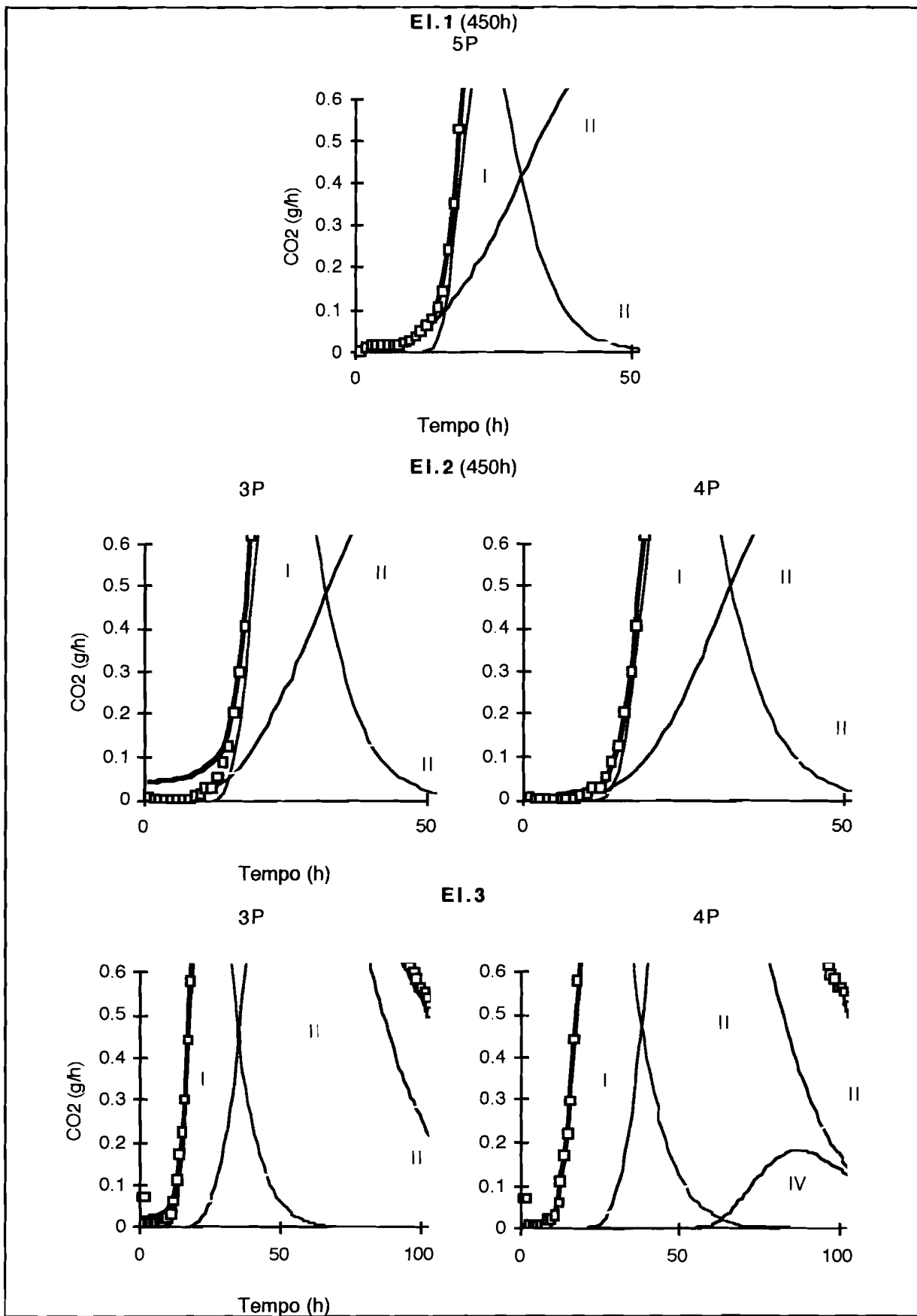


Figura A.1.2- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

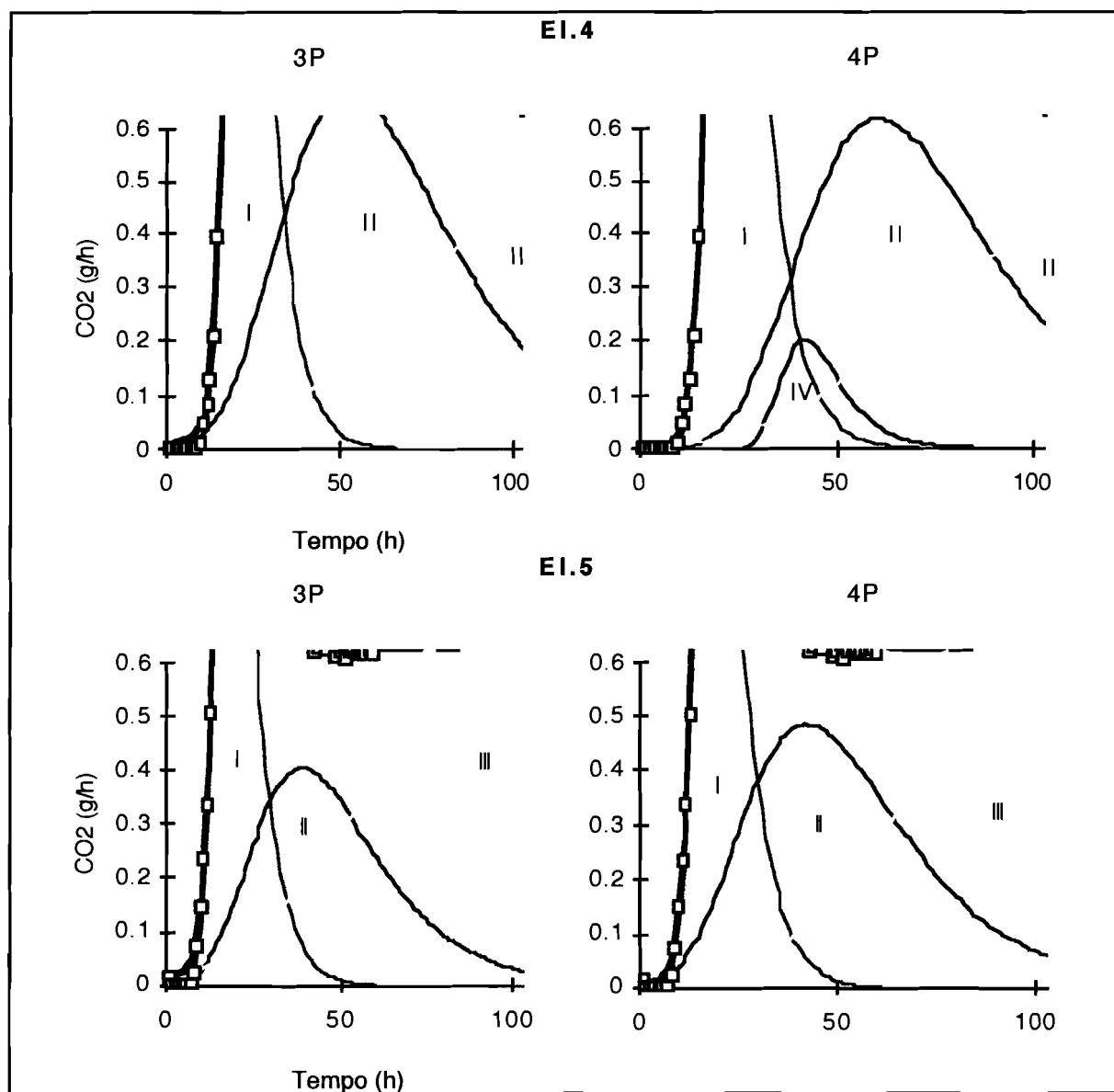


Figura A.I.2- Modelo cinético de compostagem (ensaio a 25°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

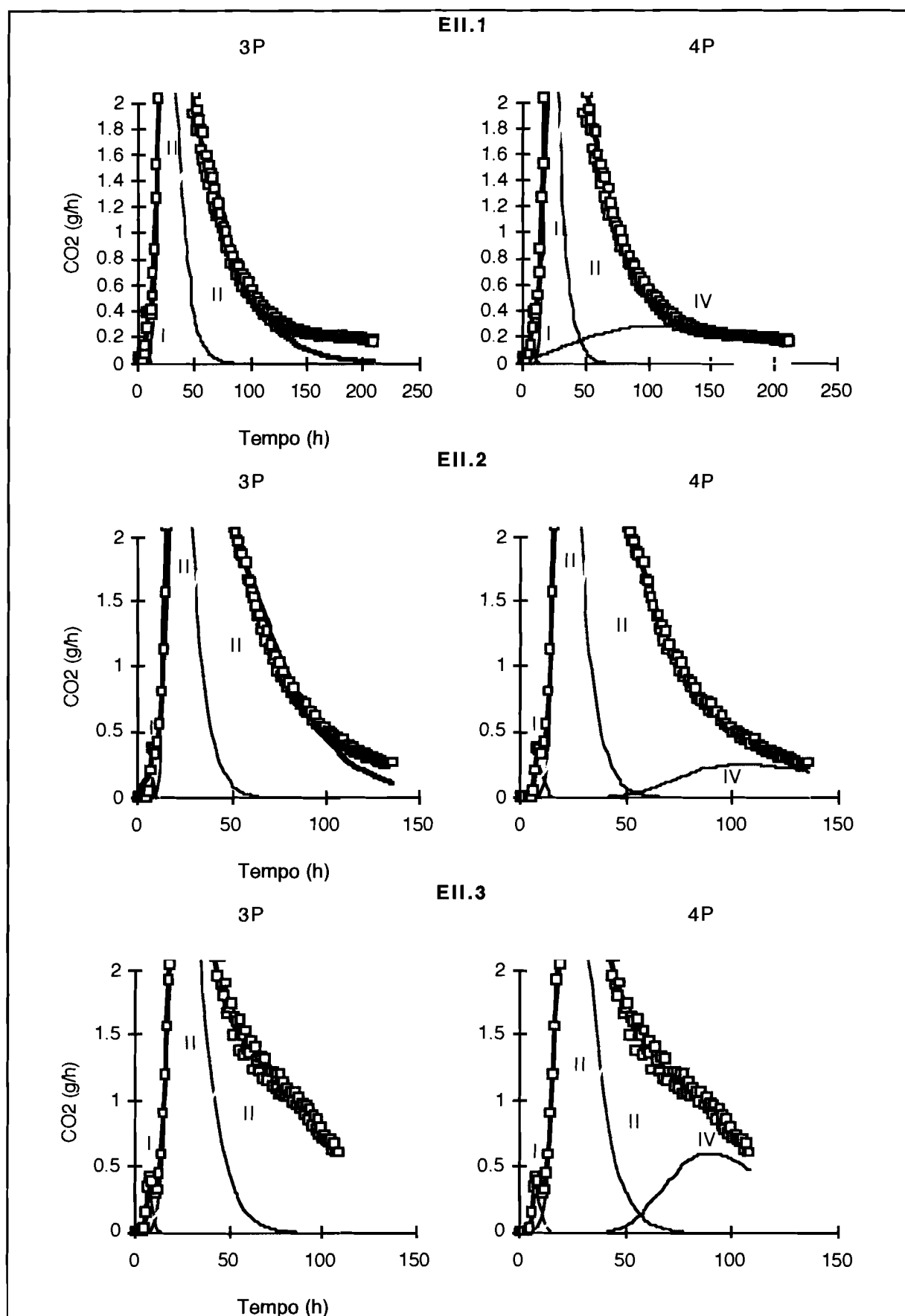


Figura A.I.3- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

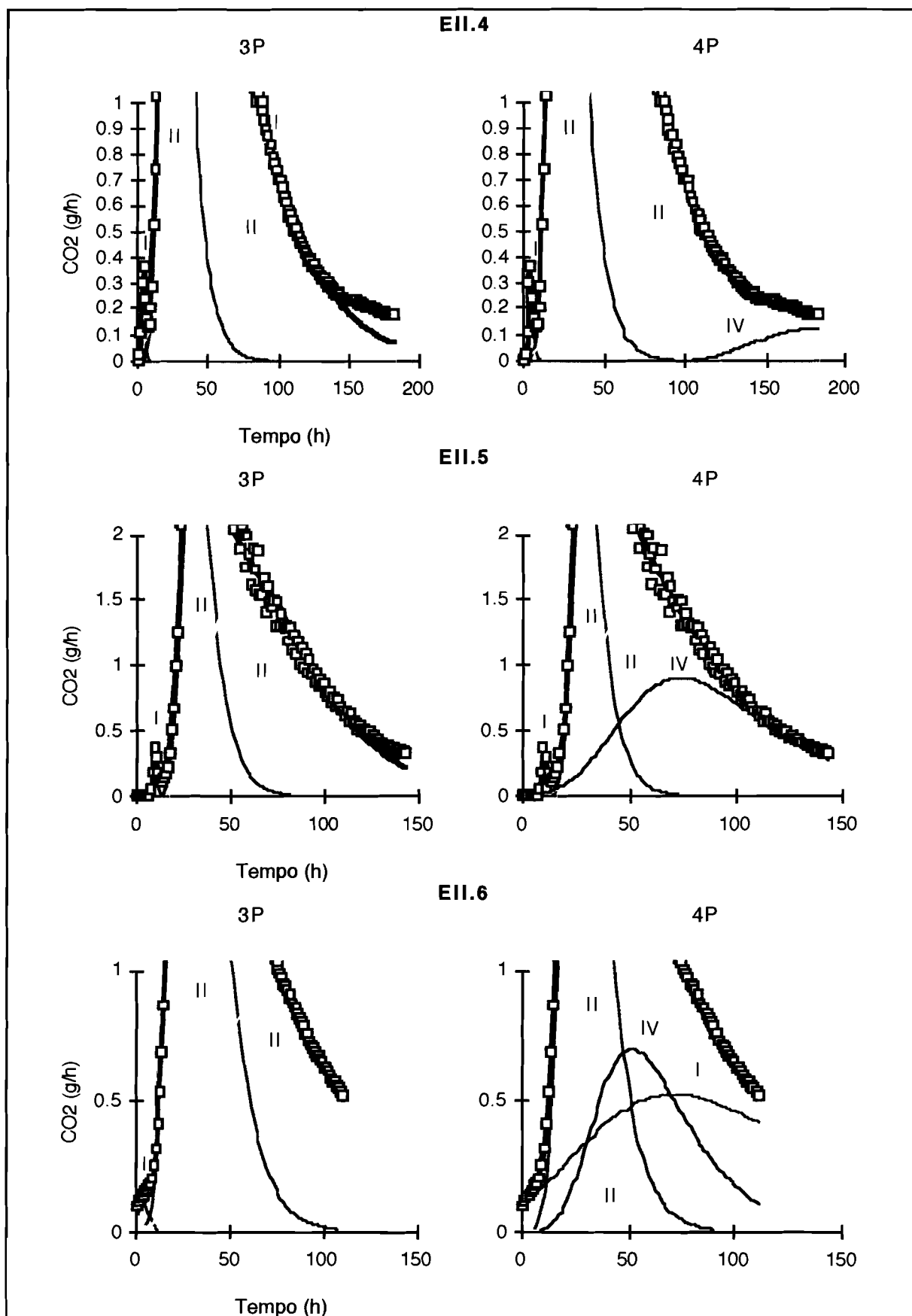


Figura A.I.3- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios^(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

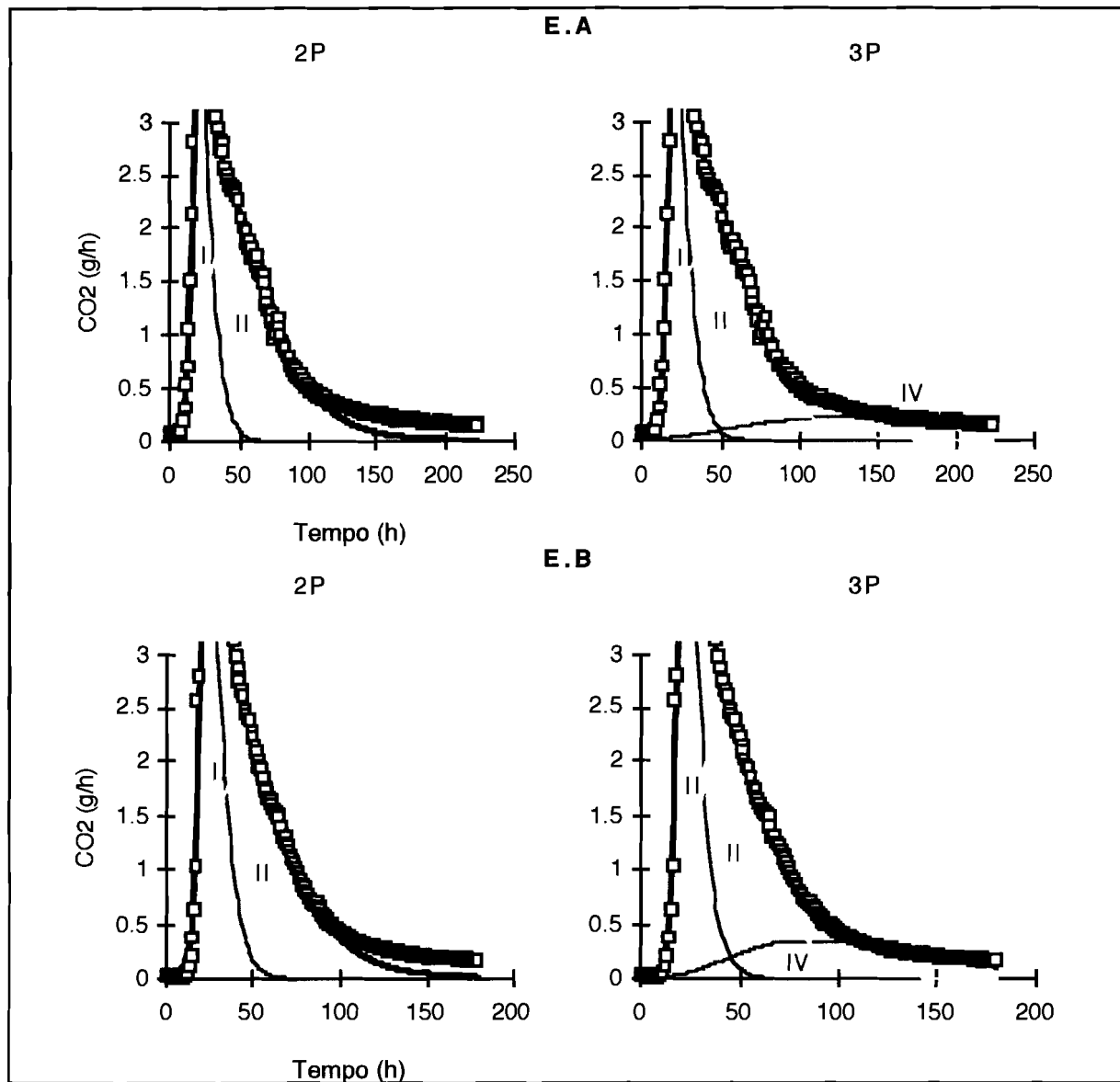


Figura A.I.3- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

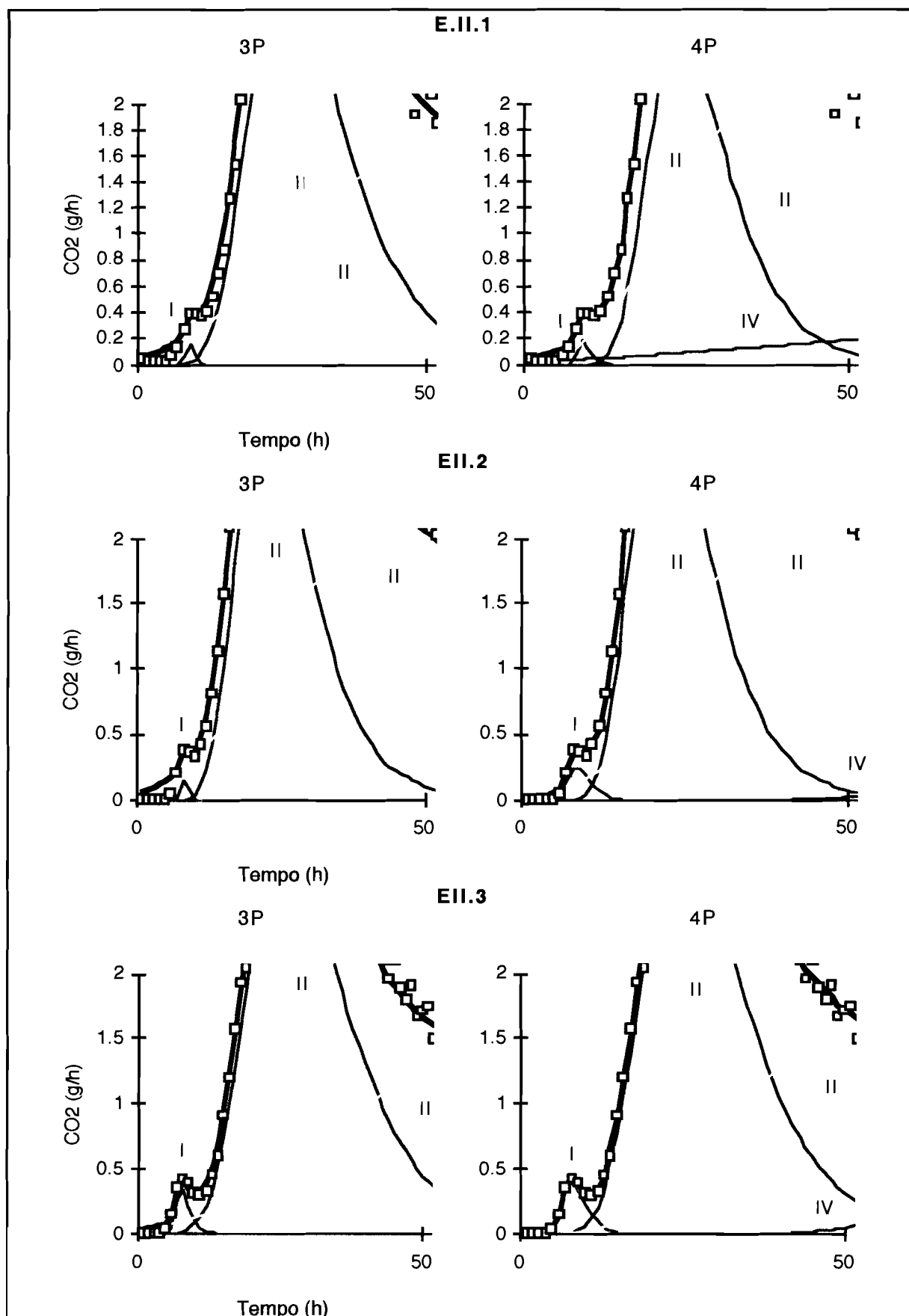


Figura A.I.4- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios^(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

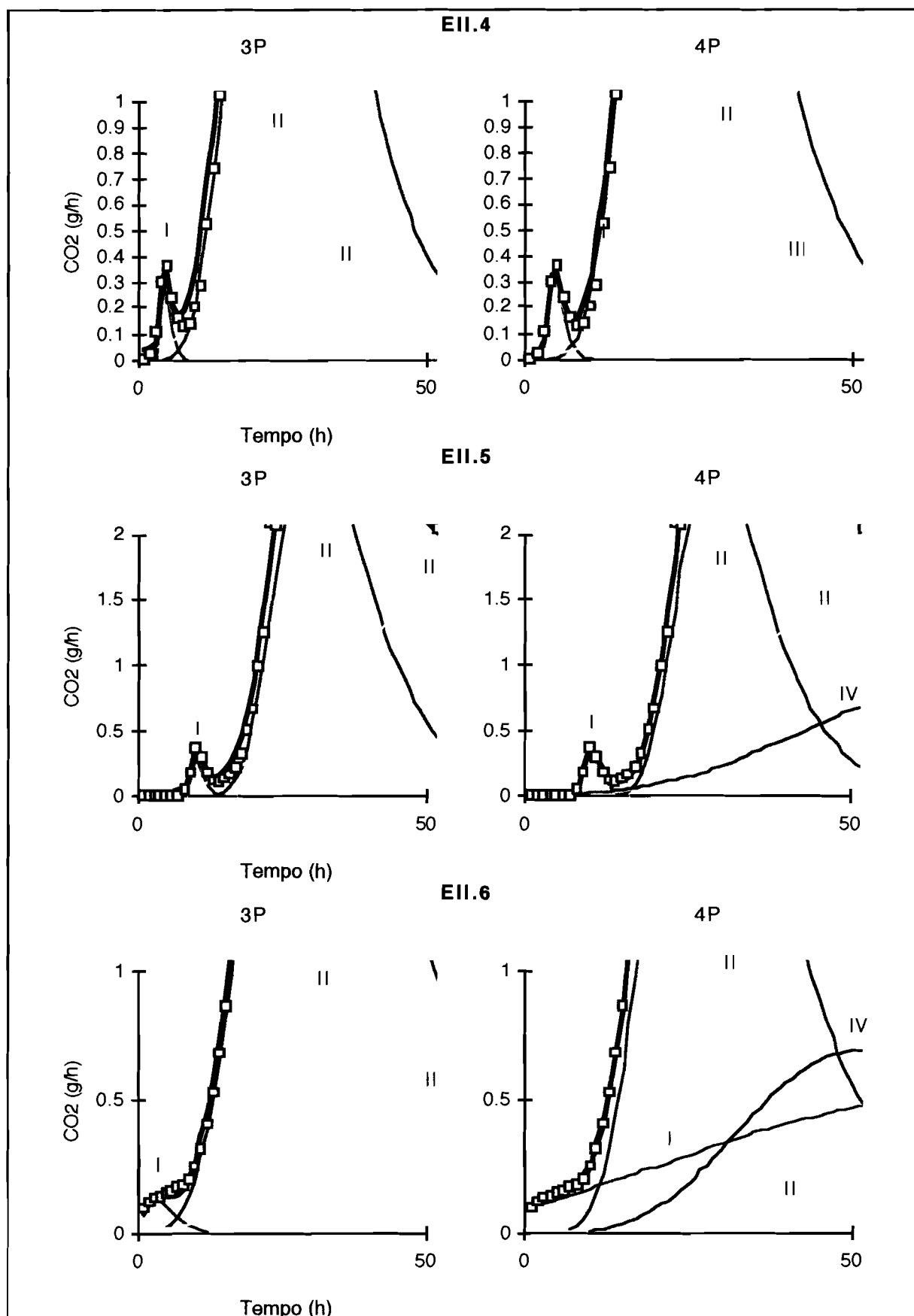


Figura A.I.4- Modelo cinético de compostagem (ensaio a 40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios^(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

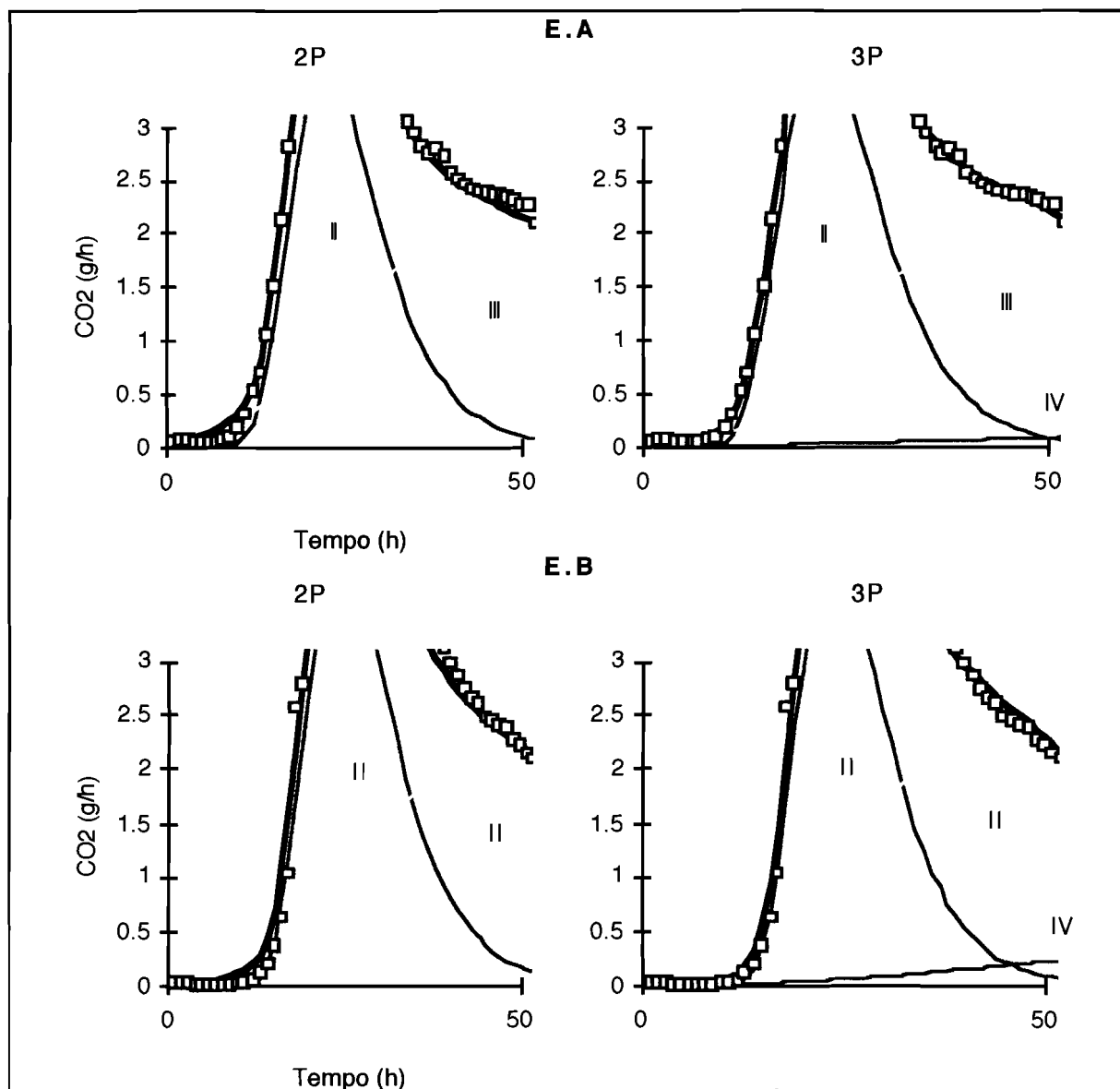


Figura A.I.4- Modelo cinético de compostagem (ensaio a 40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

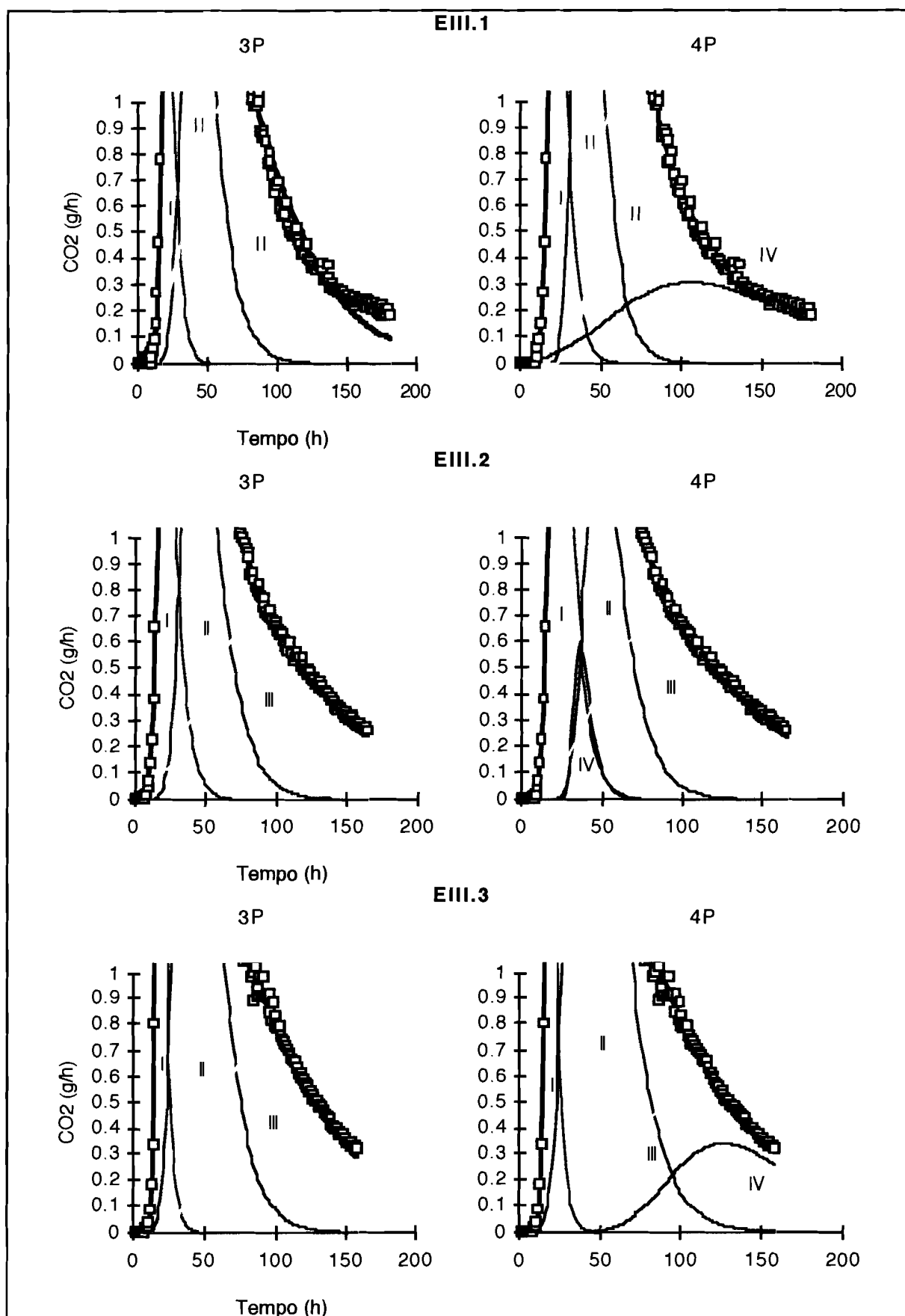


Figura A.I.5- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25-40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios^(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

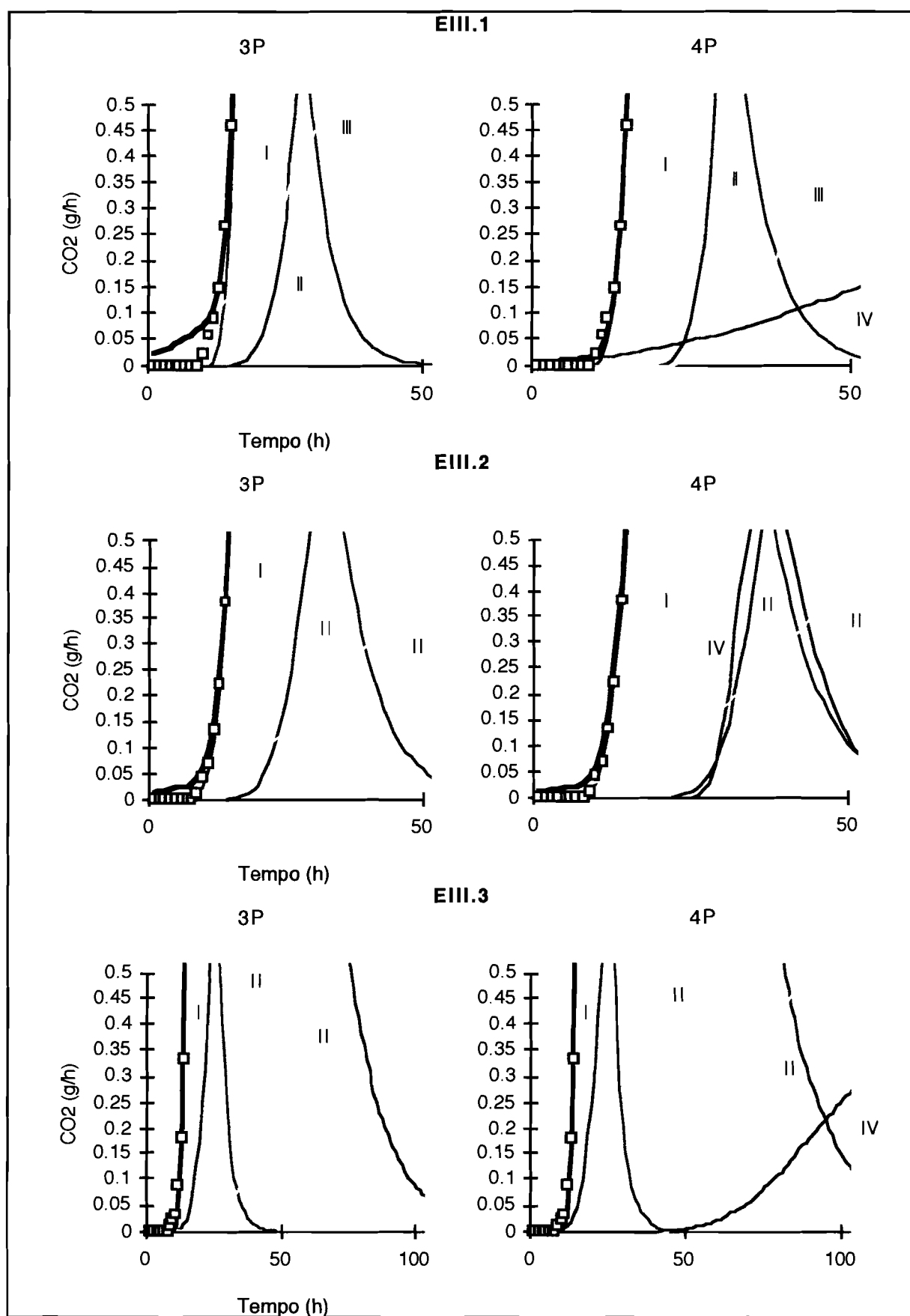


Figura A.I.6- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25-40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios^(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

Quadro A.I.1- Ensaio El.1 (213h) uma população

	GL	S Q	MSQ
Regressão	3	52.7729	17.5910
Resíduo	210	4.2726	0.0204
Total (não corrigido)	213	57.0455	
Total (corrigido)	212	12.2661	

$$r^2 = 0.652$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	103.35	2.852	97.724	108.969
LI	11.00	2.262	6.538	15.458
KI	0.76	0.019	0.724	0.800

Quadro A.I.2- Ensaio El.1 (213h) duas populações

	GL	S Q	MSQ
Regressão	6	55.5115	9.2519
Resíduo	207	1.5340	0.0074
Total (não corrigido)	213	57.0455	
Total (corrigido)	212	12.2661	

$$r^2 = 0.875$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	36.09	10.917	14.572	57.617
AII	72.87	13.086	47.068	98.664
LI	17.59	1.477	14.683	20.505
LII	44.28	19.233	6.366	82.202
KI	0.72	0.130	0.460	0.972
KII	0.45	0.040	0.374	0.531

Quadro A.I.3- Ensaio EI.1 (213h) três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	57.0075	6.3342
Resíduo	204	0.0380	0.0002
Total (não corrigido)	213	57.0455	
Total (corrigido)	212	12.2661	

$$r^2 = 0.997$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.69	0.265	9.173	10.216
AII	48.42	1.669	45.133	51.715
AIII	51.98	2.023	47.987	55.965
LI	18.82	0.073	18.675	18.962
LII	28.64	0.369	27.916	29.370
LIII	80.58	3.610	73.463	87.698
KI	0.74	0.011	0.717	0.761
KII	0.76	0.013	0.739	0.789
KIII	0.33	0.005	0.322	0.341

Quadro A.I.4- Ensaio EI.1 (213h) quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	57.0144	4.7512
Resíduo	201	0.0311	0.0002
Total (não corrigido)	213	57.0455	
Total (corrigido)	212	12.2661	

$$r^2 = 0.995$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.71	0.359	9.002	10.419
AII	43.07	4.054	35.075	51.062
AIII	58.17	4.419	49.460	66.886
AIV	0.98	0.268	0.450	1.507
LI	18.82	0.072	18.679	18.963
LII	28.65	0.722	27.228	30.076
LIII	65.59	8.914	48.017	83.171
LIV	133.41	2.258	128.960	137.864
KI	0.74	0.015	0.711	0.771
KII	0.70	0.039	0.629	0.781
KIII	0.33	0.010	0.309	0.350
KIV	0.03	0.005	0.021	0.040

Quadro A.I.5- Ensaio EI.2 (180h) uma população

	GL	SQ	MSQ
Regressão	3	69.6798	23.2266
Resíduo	177	6.4846	0.0366
Total (não corrigido)	180	76.1644	
Total (corrigido)	179	19.0102	

$$r^2 = 0.659$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	102.05	3.096	95.944	108.165
LI	14.31	1.756	10.846	17.776
KI	1.01	0.030	0.952	1.068

Quadro A.I.6- Ensaio EI.2 (180h) duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	73.9845	12.3307
Resíduo	174	2.1800	0.0125
Total (não corrigido)	180	76.1644	
Total (corrigido)	179	19.0102	

$$r^2 = 0.885$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	34.94	7.026	21.070	48.803
AII	76.05	8.430	59.410	92.686
LI	18.30	1.038	16.256	20.352
LII	35.79	9.529	16.987	54.602
KI	0.94	0.108	0.723	1.148
KII	0.59	0.039	0.512	0.667

Quadro A.I.7- Ensaio EI.2 (180h) três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	75.8973	8.4330
Resíduo	171	0.2671	0.0016
Total (não corrigido)	180	76.1644	
Total (corrigido)	179	19.0102	

$$r^2 = 0.986$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	15.79	1.767	12.304	19.280
AII	44.72	6.181	32.519	56.920
AIII	61.73	6.340	49.219	74.248
LI	18.79	0.150	18.498	19.091
LII	31.00	2.086	26.883	35.117
LIII	61.35	10.691	40.249	82.455
KI	1.02	0.065	0.897	1.152
KII	0.86	0.058	0.741	0.972
KIII	0.36	0.019	0.325	0.399

Quadro A.I.8- Ensaio EI.2 (180h) quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	75.9034	6.3353
Resíduo	168	0.2610	0.0016
Total (não corrigido)	180	76.1644	
Total (corrigido)	179	19.0102	

$$r^2 = 0.986$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	18.35	1.998	14.401	22.291
AII	38.22	6.940	24.515	51.917
AIII	54.18	9.145	36.130	72.238
AIV	7.22	14.338	-21.082	35.529
LI	18.73	0.158	18.416	19.039
LII	33.41	1.928	29.603	37.217
LIII	56.87	10.833	35.479	78.253
LIV	150.72	13.782	123.508	177.923
KI	1.12	0.067	0.985	1.250
KII	0.82	0.077	0.672	0.975
KIII	0.39	0.031	0.329	0.453
KIV	0.08	0.079	-0.079	0.233

Quadro A.I.9- Ensaio El.1 (450h) uma população

	GL	SQ	MSQ
Regressão	3	54.2880	18.0960
Resíduo	447	5.8909	0.0132
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.777$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	115.63	2.592	110.533	120.723
LI	3.81	2.452	-1.012	8.628
KI	0.71	0.014	0.678	0.734

Quadro A.I.10- Ensaio El.1 (450h) duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	58.1495	9.6916
Resíduo	444	2.0294	0.0046
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.923$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	45.65	7.492	30.927	60.375
AII	77.40	8.903	59.901	94.897
LI	18.15	1.389	15.419	20.877
LII	44.55	18.084	9.006	80.087
KI	0.73	0.068	0.591	0.860
KII	0.34	0.023	0.298	0.388

Quadro A.I.11- Ensaio El.1 (450h) três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	59.8372	6.6486
Resíduo	441	0.3417	0.0008
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.987$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.22	0.599	8.040	10.395
AII	41.80	2.804	36.288	47.309
AIII	73.34	2.781	67.871	78.802
LI	19.06	0.149	18.770	19.357
LII	29.09	1.354	26.432	31.755
LIII	48.96	5.868	37.425	60.491
KI	0.71	0.024	0.660	0.754
KII	0.65	0.020	0.605	0.686
KIII	0.30	0.009	0.285	0.319

Quadro A.I.12- Ensaio El.1 (450h) quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	60.1164	5.0097
Resíduo	438	0.0625	0.0001
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.998$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.70	0.235	9.236	10.159
AII	47.68	1.737	44.263	51.092
AIII	52.92	2.275	48.447	57.392
AIV	16.96	0.970	15.055	18.869
LI	18.81	0.064	18.689	18.940
LII	28.61	0.327	27.963	29.249
LIII	78.74	3.829	71.217	86.269
LIV	259.84	4.990	250.036	269.651
KI	0.74	0.010	0.720	0.759
KII	0.76	0.015	0.729	0.786
KIII	0.33	0.005	0.323	0.342
KIV	0.08	0.002	0.074	0.084

Quadro A.I.13- Ensaio EI.1 (450h) cinco populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	15	60.1283	4.0086
Resíduo	435	0.0506	0.0001
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.998$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.70	0.296	9.298	10.108
AII	49.77	1.382	47.049	52.483
AIII	49.28	2.094	45.169	53.399
AIV	14.28	1.848	10.650	17.912
AV	2.58	0.787	1.033	4.127
LI	18.82	0.057	18.710	18.936
LII	28.75	0.296	28.173	29.337
LIII	83.82	3.054	77.818	89.821
LIV	239.57	5.845	228.078	251.055
LV	344.13	3.326	337.594	350.668
KI	0.74	0.009	0.722	0.755
KII	0.78	0.010	0.756	0.797
KIII	0.33	0.004	0.321	0.337
KIV	0.07	0.004	0.064	0.080
KV	0.03	0.005	0.024	0.045

Quadro A.I.14- Ensaio EI.2 (450h) uma população

	GL	SQ	MSQ
Regressão	3	71.4329	23.8110
Resíduo	447	10.2239	0.0229
Total (não corrigido)	450	81.6568	
Total (corrigido)	449	40.3329	

$$r^2 = 0.747$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	115.31	2.812	109.789	120.840
LI	9.11	1.904	5.368	12.854
KI	0.92	0.021	0.880	0.963

Quadro A.I.15- Ensaio EI.2 (450h) duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	78.7079	13.1180
Resíduo	444	2.9489	0.0066
Total (não corrigido)	450	81.6568	
Total (corrigido)	449	40.3329	

$$r^2 = 0.927$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	53.82	5.918	42.191	65.452
AII	81.02	7.361	66.550	95.485
LI	18.51	0.927	16.691	20.334
LII	43.41	14.437	15.032	71.779
KI	1.00	0.060	0.880	1.114
KII	0.37	0.018	0.338	0.410

Quadro A.I.16- Ensaio EI.2 (450h) três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	81.0626	9.0070
Resíduo	441	0.5942	0.0013
Total (não corrigido)	450	81.6568	
Total (corrigido)	449	40.3329	

$$r^2 = 0.985$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	13.72	1.241	11.276	16.154
AII	47.04	3.352	40.450	53.624
AIII	75.96	2.920	70.221	81.697
LI	19.13	0.164	18.805	19.448
LII	29.60	1.681	26.299	32.906
LIII	49.22	6.101	37.233	61.214
KI	0.93	0.046	0.843	1.023
KII	0.82	0.026	0.769	0.870
KIII	0.32	0.009	0.301	0.337

Quadro A.I.17- Ensaio EI.2 (450h) quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	81.3619	6.7802
Resíduo	438	0.2949	0.0007
Total (não corrigido)	450	81.6568	
Total (corrigido)	449	40.3329	

$$r^2 = 0.993$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	15.17	1.173	12.868	17.480
AII	46.47	4.352	37.913	55.022
AIII	62.70	5.551	51.789	73.609
AIV	29.18	10.922	7.719	50.651
LI	18.84	0.107	18.627	19.048
LII	30.36	1.429	27.553	33.172
LIII	62.61	7.665	47.549	77.680
LIV	268.35	35.735	198.115	338.581
KI	1.00	0.044	0.914	1.086
KII	0.86	0.040	0.786	0.943
KIII	0.35	0.012	0.328	0.377
KIV	0.07	0.005	0.060	0.078

Quadro A.I.18- Ensaio EI.3 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	110.5767	12.2863
Resíduo	181	0.1509	0.0008
Total (não corrigido)	190	110.7276	
Total (corrigido)	189	33.7096	

$$r^2 = 0.996$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	18.17	0.690	16.808	19.530
AII	61.38	1.457	58.502	64.253
AIII	68.77	2.829	63.192	74.355
LI	17.75	0.130	17.499	18.010
LII	38.41	0.412	37.594	39.218
LIII	55.78	4.350	47.196	64.362
KI	0.97	0.016	0.941	1.004
KII	1.28	0.016	1.252	1.314
KIII	0.32	0.006	0.307	0.330

Quadro A.I.19- Ensaio EI.3 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	110.6231	9.2186
Resíduo	178	0.1045	0.0006
Total (não corrigido)	190	110.7276	
Total (corrigido)	189	33.7096	

$$r^2 = 0.997$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	22.61	0.979	20.674	24.537
AII	53.64	2.294	49.115	58.171
AIII	65.76	4.026	57.816	73.706
AIV	7.80	2.543	2.787	12.822
LI	17.86	0.113	17.638	18.083
LII	40.71	0.371	39.982	41.445
LIII	69.04	7.098	55.028	83.042
LIV	71.69	2.787	66.192	77.192
KI	1.06	0.019	1.020	1.094
KII	1.32	0.021	1.278	1.361
KIII	0.31	0.008	0.293	0.325
KIV	0.18	0.042	0.099	0.264

Quadro A.I.20- Ensaio EI.4 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	98.8742	10.9860
Resíduo	216	0.1597	0.0007
Total (não corrigido)	225	99.0339	
Total (corrigido)	224	21.3748	

$$r^2 = 0.993$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	20.96	1.171	18.655	23.272
AII	42.81	10.982	21.163	64.455
AIII	83.84	11.066	62.030	105.654
LI	16.76	0.094	16.571	16.940
LII	29.28	2.129	25.080	33.473
LIII	63.71	13.088	37.916	89.510
KI	1.34	0.042	1.258	1.426
KII	0.67	0.099	0.475	0.863
KIII	0.50	0.041	0.417	0.579

Quadro A.I.21- Ensaio El.4 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	98.9007	8.2417
Resíduo	213	0.1332	0.0006
Total (não corrigido)	225	99.0339	
Total (corrigido)	224	21.3748	

$$r^2 = 0.994$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	25.01	3.112	18.877	31.146
AII	38.91	16.473	6.438	71.379
AIII	79.55	10.147	59.551	99.553
AIV	4.09	5.371	-6.498	14.675
LI	16.73	0.112	16.512	16.951
LII	37.57	9.798	18.257	56.884
LIII	69.31	11.731	46.183	92.432
LIV	34.57	2.084	30.464	38.679
KI	1.49	0.113	1.270	1.716
KII	0.62	0.152	0.316	0.916
KIII	0.48	0.046	0.387	0.568
KIV	0.20	0.196	-0.183	0.588

Quadro A.I.22- Ensaio El.5 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	78.7343	8.7483
Resíduo	251	0.2008	0.0008
Total (não corrigido)	260	78.9350	
Total (corrigido)	259	16.6602	

$$r^2 = 0.988$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	16.22	1.838	12.598	19.840
AII	19.07	4.968	9.283	28.851
AIII	99.03	3.937	91.279	106.785
LI	13.28	0.142	13.002	13.563
LII	21.88	3.948	14.107	29.657
LIII	52.92	4.299	44.450	61.383
KI	1.07	0.076	0.922	1.222
KII	0.40	0.053	0.300	0.510
KIII	0.63	0.013	0.609	0.659

Quadro A.I.23- Ensaio EI.5 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	78.7709	6.5642
Resíduo	248	0.1641	0.0007
Total (não corrigido)	260	78.9350	
Total (corrigido)	259	16.6602	

$$r^2 = 0.990$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	17.09	1.113	14.894	19.279
AII	25.94	3.949	18.163	33.718
AIII	87.85	4.071	79.828	95.865
AIV	3.70	1.604	0.537	6.855
LI	13.22	0.122	12.984	13.463
LII	22.72	1.914	18.955	26.494
LIII	63.61	4.106	55.520	71.694
LIV	220.85	5.106	210.796	230.910
KI	1.09	0.042	1.009	1.175
KII	0.49	0.037	0.414	0.558
KIII	0.62	0.012	0.595	0.644
KIV	0.05	0.007	0.034	0.063

Quadro A.I.24- Ensaio EII.1 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	400.3592	44.4844
Resíduo	202	3.9556	0.0196
Total (não corrigido)	211	404.3148	
Total (corrigido)	210	229.9646	

$$r^2 = 0.983$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.32	0.363	-0.398	1.034
AII	66.39	5.297	55.946	76.833
AIII	115.38	6.036	103.474	127.277
LI	8.07	0.682	6.723	9.412
LII	17.81	0.300	17.217	18.398
LIII	22.57	2.194	18.248	26.901
KI	0.17	0.187	-0.194	0.543
KII	3.00	0.139	2.724	3.273
KIII	1.58	0.078	1.422	1.731

Quadro A.I.25- Ensaio EII.1 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	403.1571	33.5964
Resíduo	199	1.1577	0.0058
Total (não corrigido)	211	404.3148	
Total (corrigido)	210	229.9646	

$$r^2 = 0.995$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.48	0.341	-0.192	1.154
AII	41.45	4.123	33.320	49.582
AIII	107.57	10.267	87.326	127.818
AIV	51.94	9.178	33.837	70.034
LI	7.99	0.566	6.871	9.105
LII	18.05	0.249	17.564	18.545
LIII	21.12	1.521	18.121	24.118
LIV	38.60	20.225	-1.278	78.486
KI	0.18	0.078	0.027	0.333
KII	2.51	0.153	2.205	2.810
KIII	2.11	0.140	1.834	2.387
KIV	0.29	0.033	0.227	0.355

Quadro A.I.26- Ensaio EII.2 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	409.2305	45.4701
Resíduo	127	1.6765	0.0132
Total (não corrigido)	136	410.9070	
Total (corrigido)	135	177.0321	

$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	16.72	462286.705	-914765.244	914798.680
AII	51.43	3.324	44.849	58.005
AIII	126.62	3.946	118.815	134.433
LI	8.12	54.760	-100.236	116.483
LII	16.14	0.204	15.737	16.546
LIII	20.83	1.232	18.396	23.272
KI	61.11	1904909.729	-3769411.470	3769533.697
KII	2.99	0.109	2.775	3.206
KIII	2.01	0.054	1.904	2.117

Quadro A.I.27- Ensaio EII.2 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	410.2203	34.1850
Resíduo	124	0.6866	0.0055
Total (não corrigido)	136	410.9070	
Total (corrigido)	135	177.0321	

$$r^2 = 0.996$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	1.08	0.733	-0.374	2.528
AII	50.25	6.460	37.460	63.034
AIII	112.14	11.773	88.837	135.442
AIV	23.64	9.343	5.143	42.130
LI	6.95	0.579	5.802	8.093
LII	15.89	0.218	15.460	16.324
LIII	22.87	2.507	17.909	27.832
LIV	71.91	15.941	40.362	103.466
KI	0.26	0.097	0.067	0.450
KII	3.10	0.270	2.569	3.640
KIII	2.17	0.080	2.015	2.331
KIV	0.26	0.050	0.158	0.354

Quadro A.I.28- Ensaio EII.3 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	326.0991	36.2332
Resíduo	100	0.9117	0.0091
Total (não corrigido)	109	327.0108	
Total (corrigido)	108	95.6663	

$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	1.04	0.419	0.204	1.866
AII	69.35	5.015	59.400	79.298
AIII	109.04	6.819	95.512	122.570
LI	6.61	0.463	5.692	7.530
LII	17.67	0.225	17.220	18.111
LIII	28.96	3.576	21.870	36.060
KI	0.34	0.092	0.157	0.522
KII	3.05	0.130	2.788	3.306
KIII	1.28	0.035	1.214	1.355

Quadro A.I.29- Ensaio Ell.3 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	326.2781	27.1898
Resíduo	97	0.7328	0.0076
Total (não corrigido)	109	327.0108	
Total (corrigido)	108	95.6663	

$$r^2 = 0.992$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	1.77	1.119	-0.446	3.995
AII	64.36	44.890	-24.738	153.449
AIII	70.18	76.776	-82.196	222.562
AIV	39.22	36.269	-32.766	111.203
LI	6.33	0.434	5.473	7.196
LII	17.34	0.522	16.301	18.374
LIII	28.16	22.492	-16.485	72.796
LIV	65.84	13.358	39.331	92.355
KI	0.40	0.125	0.155	0.652
KII	3.06	1.578	-0.073	6.191
KIII	1.37	0.581	0.214	2.519
KIV	0.59	0.483	-0.364	1.554

Quadro A.I.30- Ensaio Ell.4 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	334.3493	37.1499
Resíduo	174	1.2741	0.0073
Total (não corrigido)	183	335.6234	
Total (corrigido)	182	153.0911	

$$r^2 = 0.992$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.68	0.258	0.175	1.192
AII	68.56	4.588	59.508	77.617
AIII	113.80	5.334	103.277	124.332
LI	3.80	0.397	3.017	4.584
LII	15.72	0.203	15.322	16.122
LIII	27.91	2.790	22.399	33.413
KI	0.33	0.117	0.103	0.565
KII	2.87	0.109	2.659	3.089
KIII	1.35	0.036	1.283	1.426

Quadro A.I.31- Ensaio Ell.4 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	334.7050	27.8921
Resíduo	171	0.9184	0.0054
Total (não corrigido)	183	335.6234	
Total (corrigido)	182	153.0911	

$$r^2 = 0.994$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.94	0.231	0.483	1.394
AII	73.19	6.118	61.113	85.268
AIII	104.96	7.933	89.305	120.624
AIV	13.32	9.919	-6.264	32.895
LI	3.49	0.317	2.868	4.118
LII	15.57	0.149	15.277	15.865
LIII	31.60	3.847	24.002	39.189
LIV	139.46	9.976	119.773	159.156
KI	0.34	0.069	0.209	0.479
KII	3.02	0.150	2.723	3.316
KIII	1.36	0.035	1.290	1.428
KIV	0.12	0.025	0.073	0.172

Quadro A.I.32- Ensaio Ell.5 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	354.4307	39.3812
Resíduo	134	1.8568	0.0139
Total (não corrigido)	143	356.2874	
Total (corrigido)	142	136.3502	

$$r^2 = 0.986$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.67	0.318	0.043	1.302
AII	58.46	4.470	49.624	67.305
AIII	123.53	5.288	113.068	133.984
LI	9.16	0.413	8.345	9.980
LII	22.93	0.258	22.419	23.439
LIII	31.54	2.182	27.223	35.854
KI	0.30	0.118	0.066	0.532
KII	2.78	0.119	2.549	3.020
KIII	1.63	0.049	1.529	1.721

Quadro A.I.33- Ensaio EII.5 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	355.0771	29.5898
Resíduo	131	1.2103	0.0092
Total (não corrigido)	143	356.2874	
Total (corrigido)	142	136.3502	

$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	1.00	0.420	0.168	1.831
AII	46.53	14.748	17.360	75.709
AIII	57.49	52.208	-45.785	160.773
AIV	82.36	41.597	0.066	164.644
LI	9.03	0.435	8.167	9.886
LII	22.57	0.321	21.936	23.207
LIII	29.11	7.910	13.466	44.762
LIV	40.25	18.775	3.111	77.393
KI	0.33	0.096	0.140	0.519
KII	2.60	0.596	1.423	3.781
KIII	1.33	0.872	-0.391	3.059
KIV	0.90	0.443	0.019	1.772

Quadro A.I.34- Ensaio EII.6 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	281.5734	31.2859
Resíduo	102	0.1481	0.0015
Total (não corrigido)	111	281.7214	
Total (corrigido)	110	82.0541	

$$r^2 = 0.998$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.80	0.309	0.189	1.415
AII	87.16	8.502	70.300	104.028
AIII	79.36	10.350	58.827	99.885
LI	0.99	0.812	-0.624	2.596
LII	17.74	0.163	17.422	18.065
LIII	34.84	7.127	20.702	48.973
KI	0.13	0.031	0.064	0.189
KII	2.71	0.177	2.358	3.058
KIII	0.89	0.054	0.784	1.000

Quadro A.I.35- Ensaio EII.6 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	281.6999	23.4750
Resíduo	99	0.0215	0.0002
Total (não corrigido)	111	281.7214	
Total (corrigido)	110	82.0541	

$$r^2 = 0.9997$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	72.71	29.042	15.086	130.337
AII	62.23	21.931	18.715	105.747
AIII	4.23	1.027	2.188	6.264
AIV	39.95	62.520	-82.121	162.017
LI	20.68	5.591	9.582	31.770
LII	17.84	0.216	17.414	18.271
LIII	34.76	0.260	34.244	35.277
LIV	30.94	23.265	-15.223	77.104
KI	0.53	0.446	-0.358	1.410
KII	2.37	0.660	1.061	3.681
KIII	0.33	0.051	0.228	0.431
KIV	0.70	0.714	-0.720	2.112

Quadro A.I.36- Ensaio E.A duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	475.1828	79.1971
Resíduo	218	3.3917	0.0156
Total (não corrigido)	224	478.5745	
Total (corrigido)	223	289.8542	

$$r^2 = 0.988$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AII	59.64	3.003	53.722	65.560
AIII	132.41	3.597	125.324	139.502
LII	16.28	0.161	15.962	16.597
LIII	22.52	1.148	20.254	24.778
KII	3.60	0.100	3.399	3.793
KIII	2.07	0.046	1.977	2.157

Quadro A.I.37- Ensaio E.A três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	477.9655	53.1073
Resíduo	215	0.6090	0.0028
Total (não corrigido)	224	478.5745	
Total (corrigido)	223	289.8542	

$$r^2 = 0.998$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AII	60.51	3.209	54.187	66.838
AIII	113.01	10.050	93.204	132.821
AIV	42.14	9.581	23.253	61.022
LII	16.08	0.083	15.916	16.244
LIII	24.55	1.525	21.539	27.553
LIV	54.65	29.549	-3.588	112.898
KII	3.74	0.123	3.502	3.988
KIII	2.10	0.100	1.904	2.297
KIV	0.21	0.019	0.174	0.249

Quadro A.I.38- Ensaio E.B duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	506.3291	84.3882
Resíduo	174	3.3536	0.0193
Total (não corrigido)	180	509.6827	
Total (corrigido)	179	307.2067	

$$r^2 = 0.989$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AII	67.23	4.830	57.696	76.760
AIII	114.86	5.399	104.201	125.512
LII	18.51	0.172	18.173	18.853
LIII	25.52	1.668	22.229	28.815
KII	4.06	0.166	3.729	4.386
KIII	2.09	0.075	1.940	2.237

Quadro A.I.39- Ensaio E.B três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	508.6802	56.5200
Resíduo	171	1.0025	0.0059
Total (não corrigido)	180	509.6827	
Total (corrigido)	179	307.2067	

$$r^2 = 0.989$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AII	59.76	6.845	46.246	73.269
AIII	95.33	19.652	56.541	134.126
AIV	40.02	14.752	10.904	69.145
LII	18.37	0.116	18.138	18.594
LIII	25.66	2.456	20.807	30.504
LIV	43.71	24.020	-3.698	91.128
KII	4.03	0.307	3.422	4.635
KIII	2.28	0.281	1.724	2.833
KIV	0.35	0.098	0.153	0.540

Quadro A.I.40- Ensaio EIII.1 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	261.8364	29.0929
Resíduo	172	1.0257	0.0060
Total (não corrigido)	181	262.8620	
Total (corrigido)	180	111.5437	

$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	19.75	1.323	17.142	22.363
AII	54.74	3.908	47.023	62.452
AIII	92.84	4.319	84.312	101.363
LI	16.74	0.147	16.447	17.027
LII	30.13	0.538	29.067	31.191
LIII	32.26	2.260	27.804	36.724
KI	1.76	0.057	1.651	1.875
KII	1.83	0.077	1.674	1.978
KIII	1.01	0.053	0.907	1.115

Quadro A.I.41- Ensaio EIII.1 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	262.4092	21.8674
Resíduo	169	0.4529	0.0027
Total (não corrigido)	181	262.8620	
Total (corrigido)	180	111.5437	

$$r^2 = 0.996$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	28.43	1.316	25.831	31.027
AII	48.39	9.533	29.565	67.205
AIII	53.18	14.215	25.117	81.240
AIV	46.00	6.964	32.252	59.748
LI	16.68	0.094	16.495	16.866
LII	31.72	0.254	31.222	32.226
LIII	45.71	5.094	35.653	55.766
LIV	51.43	11.786	28.162	74.695
KI	2.04	0.040	1.960	2.117
KII	2.11	0.262	1.595	2.631
KIII	1.09	0.187	0.725	1.463
KIV	0.31	0.059	0.192	0.424

Quadro A.I.42- Ensaio EIII.2 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	208.7770	23.1974
Resíduo	156	1.3178	0.0084
Total (não corrigido)	165	210.0948	
Total (corrigido)	164	71.7340	

$$r^2 = 0.982$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	28.97	3.401	22.249	35.685
AII	56.94	6.564	43.976	69.909
AIII	76.14	7.613	61.105	91.179
LI	16.30	0.272	15.767	16.841
LII	32.05	1.257	29.571	34.536
LIII	41.44	7.576	26.478	56.407
KI	1.69	0.086	1.516	1.857
KII	1.64	0.111	1.417	1.854
KIII	0.65	0.048	0.554	0.745

Quadro A.I.43- Ensaio EIII.2 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	208.9001	17.4083
Resíduo	153	1.1948	0.0078
Total (não corrigido)	165	210.0948	
Total (corrigido)	164	71.7340	

$$r^2 = 0.983$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	34.44	3.434	27.659	41.229
AII	42.76	22.680	-2.042	87.571
AIII	76.12	9.269	57.811	94.436
AIV	8.37	17.121	-25.454	42.195
LI	16.67	0.254	16.167	17.171
LII	37.70	8.024	21.846	53.549
LIII	42.39	8.677	25.244	59.527
LIV	31.88	0.866	30.174	33.596
KI	1.84	0.088	1.665	2.012
KII	1.34	0.506	0.342	2.342
KIII	0.66	0.068	0.527	0.795
KIV	0.60	0.892	-1.157	2.366

Quadro A.I.44- Ensaio EIII.3 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	285.0587	31.6732
Resíduo	149	0.8887	0.0060
Total (não corrigido)	158	285.9474	
Total (corrigido)	157	94.5038	

$$r^2 = 0.991$$

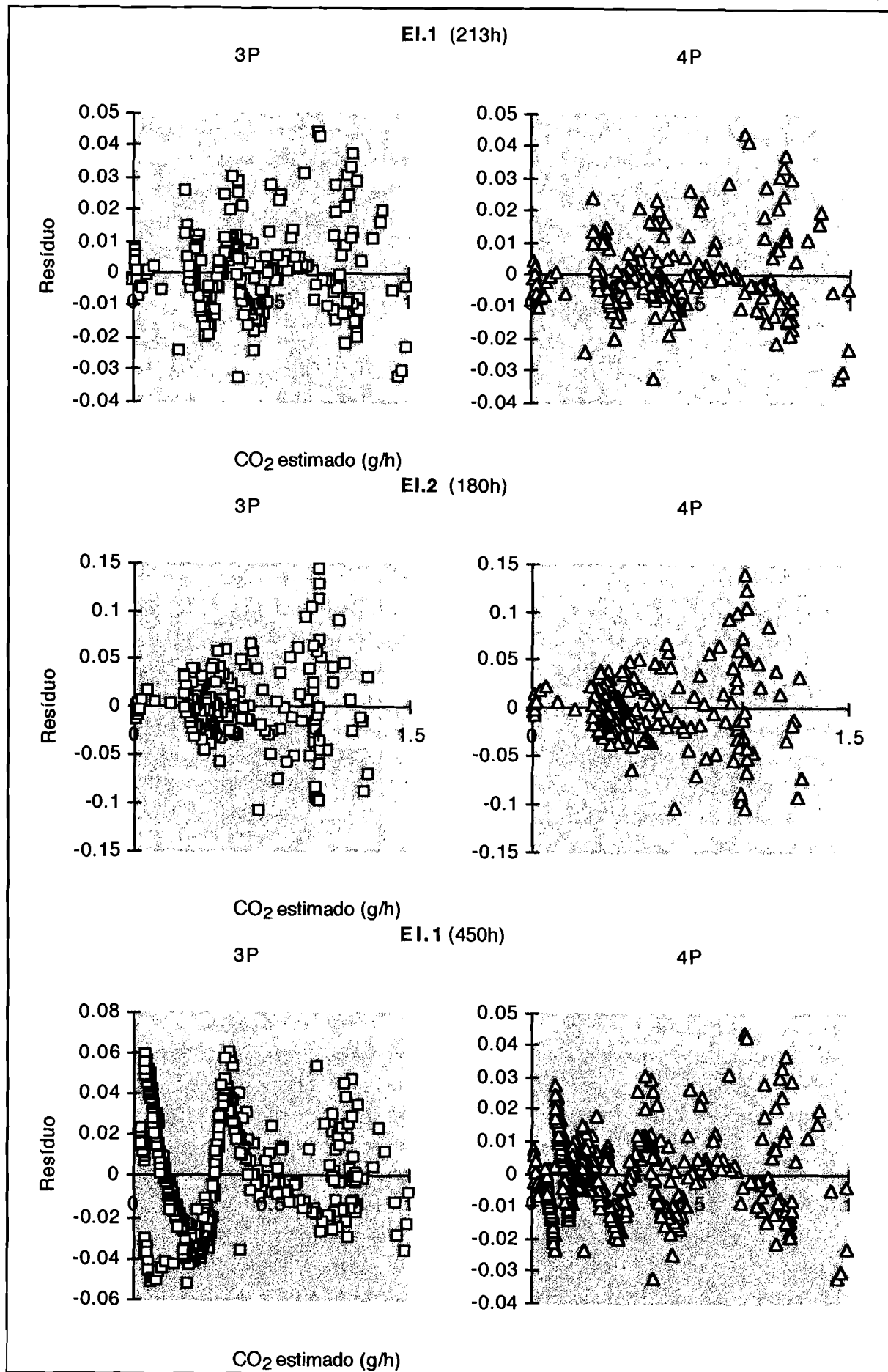
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	20.35	0.846	18.679	22.022
AII	90.72	8.582	73.764	107.682
AIII	73.97	9.518	55.166	92.780
LI	15.35	0.094	15.161	15.532
LII	29.02	0.363	28.299	29.735
LIII	55.36	8.339	38.878	71.834
KI	2.12	0.043	2.033	2.202
KII	2.50	0.123	2.255	2.742
KIII	0.74	0.044	0.654	0.827

Quadro A.I.45- Ensaio EIII.3 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	285.0947	23.7579
Resíduo	146	0.8527	0.0058
Total (não corrigido)	158	285.9474	
Total (corrigido)	157	94.5038	

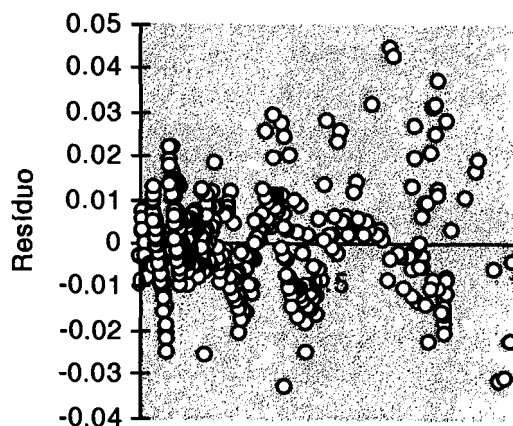
$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	19.28	1.046	17.212	21.345
AII	106.59	10.144	86.541	126.637
AIII	25.87	205.983	-381.226	432.962
AIV	35.76	230.335	-419.456	490.986
LI	15.35	0.094	15.164	15.536
LII	28.92	0.480	27.969	29.868
LIII	68.56	3.153	62.331	74.793
LIV	87.80	309.085	-523.061	698.656
KI	2.07	0.055	1.964	2.180
KII	2.67	0.109	2.451	2.884
KIII	0.47	3.044	-5.545	6.486
KIV	0.34	1.706	-3.034	3.710



(continua)

El.1 (450h)
5P

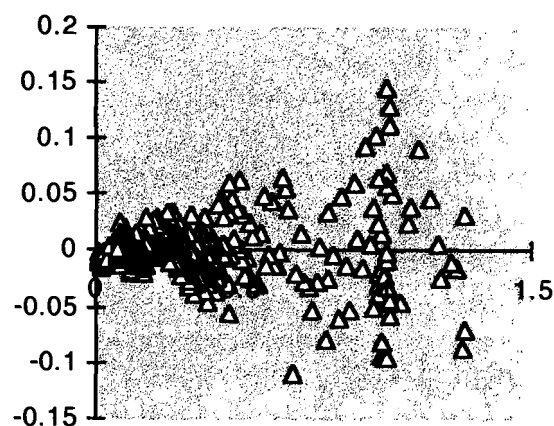
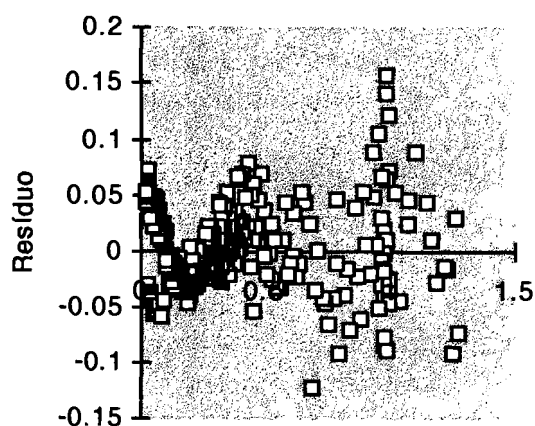


CO₂ estimado (g/h)

El.2 (450h)

3P

4P

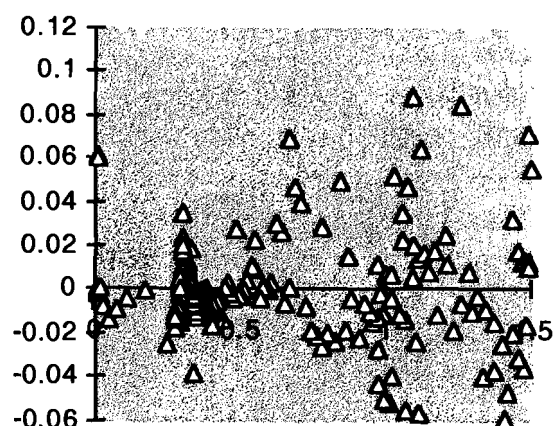
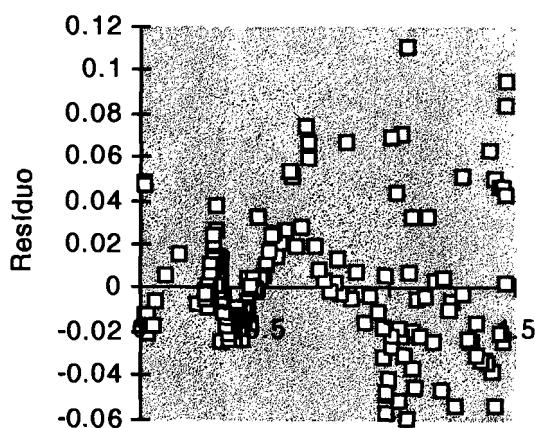


CO₂ estimado (g/h)

El.3

3P

4P



CO₂ estimado (g/h)

(continua)

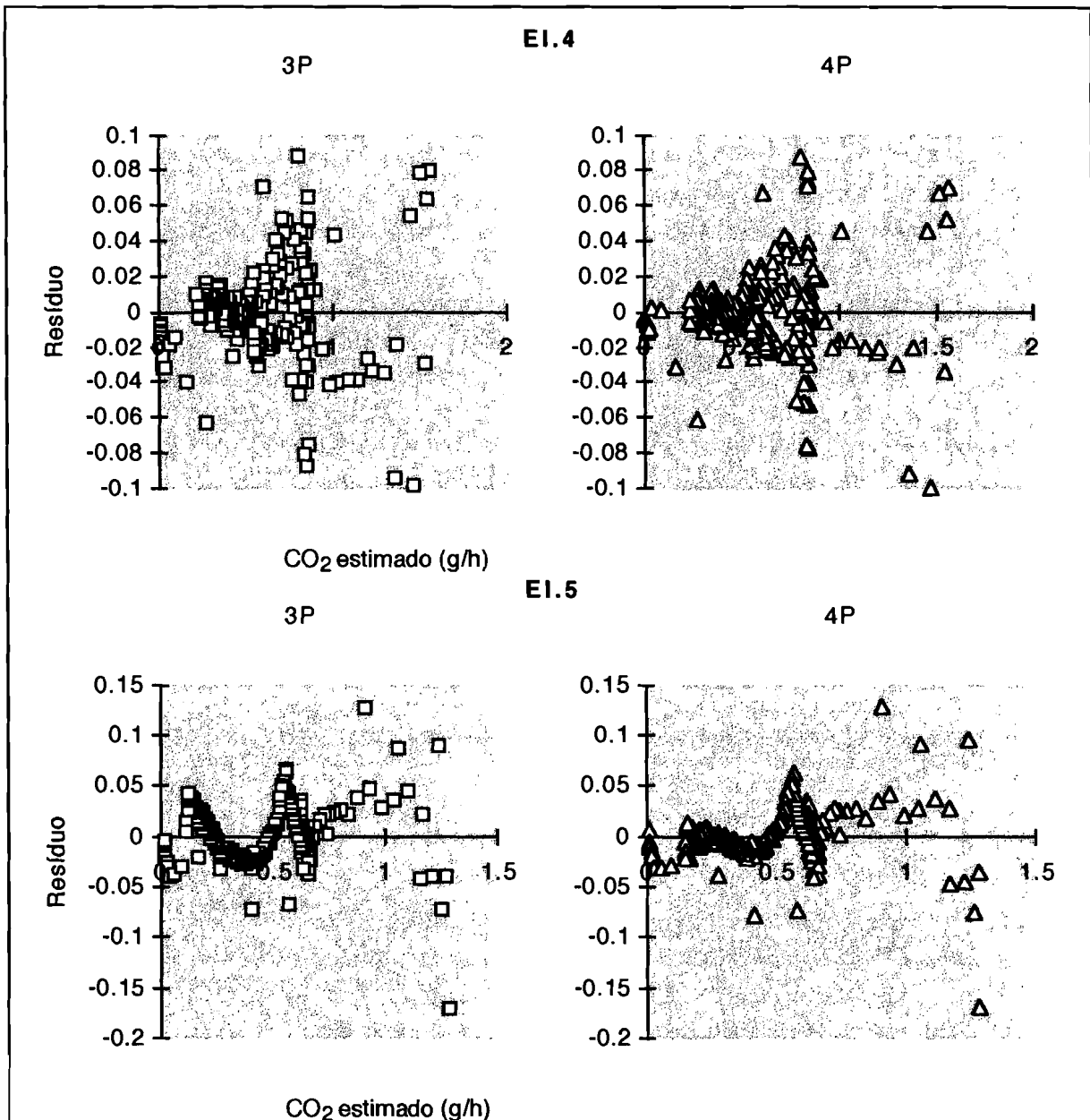
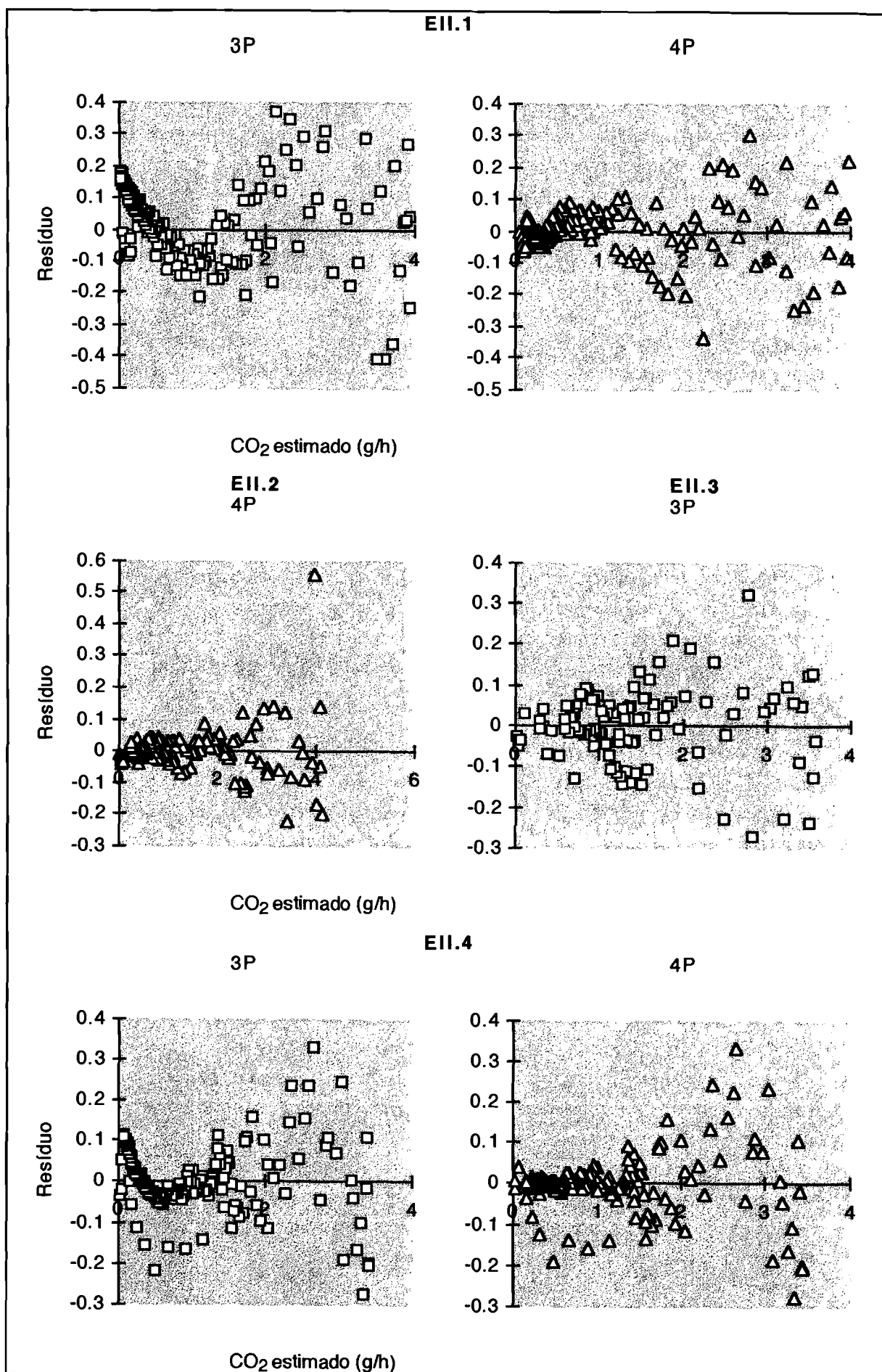
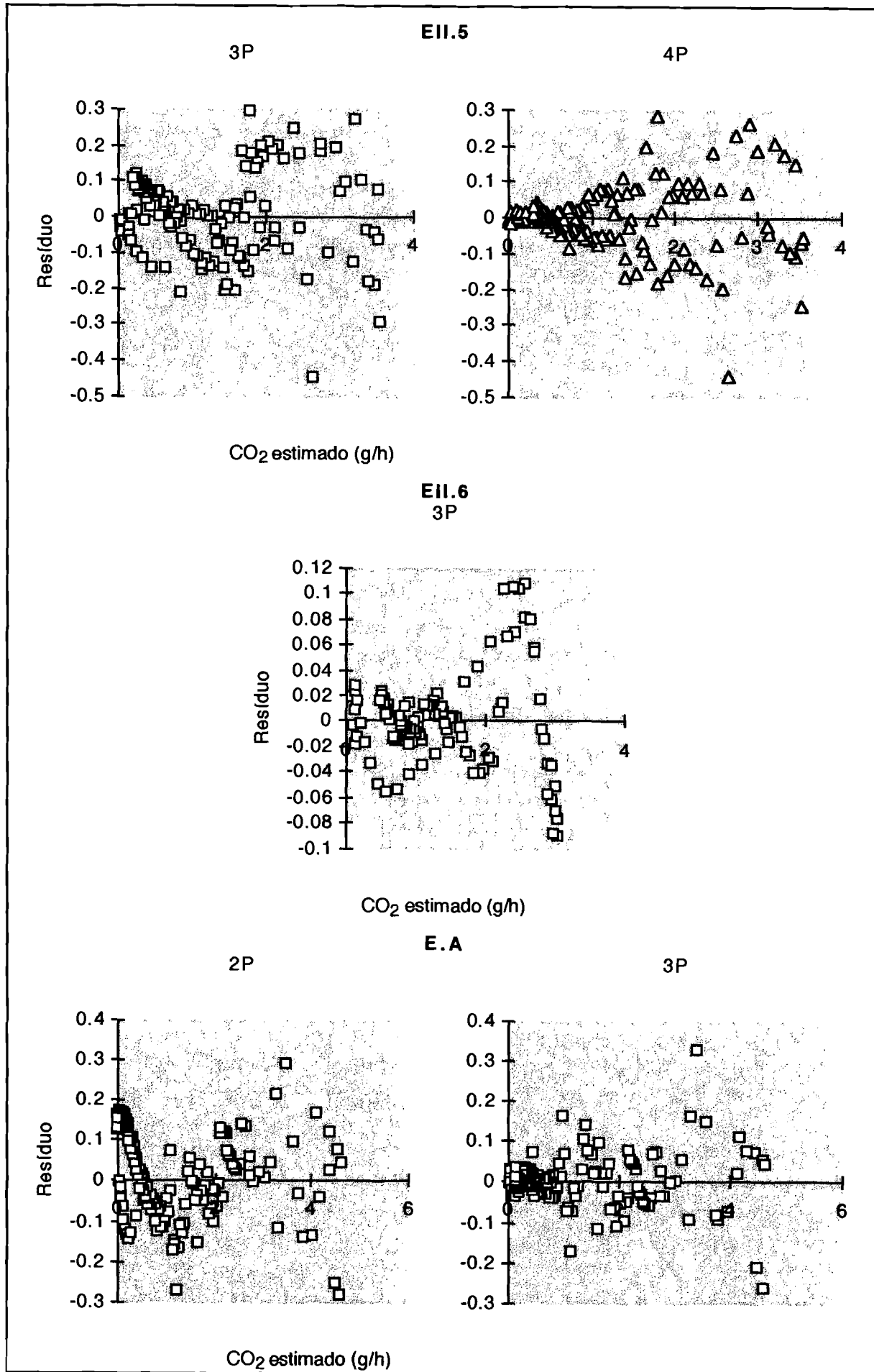


Figura A.II.1- Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO₂-
ensaios a 25°C



(continua)



(continua)

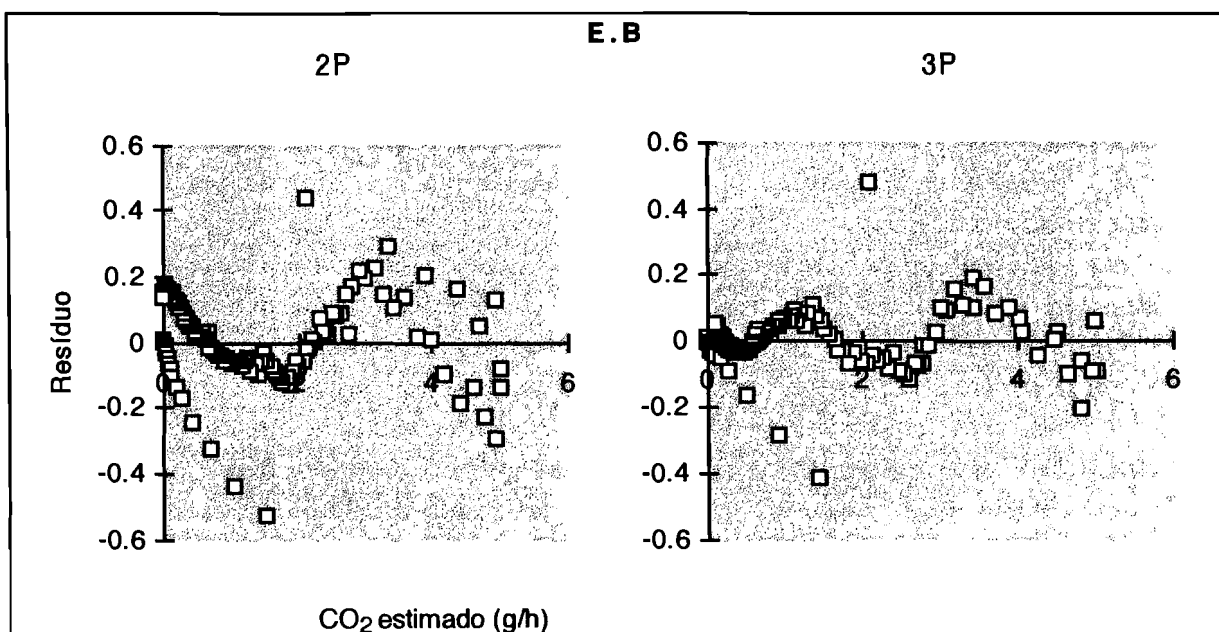


Figura A.II.2- Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO₂-
ensaios a 40°C

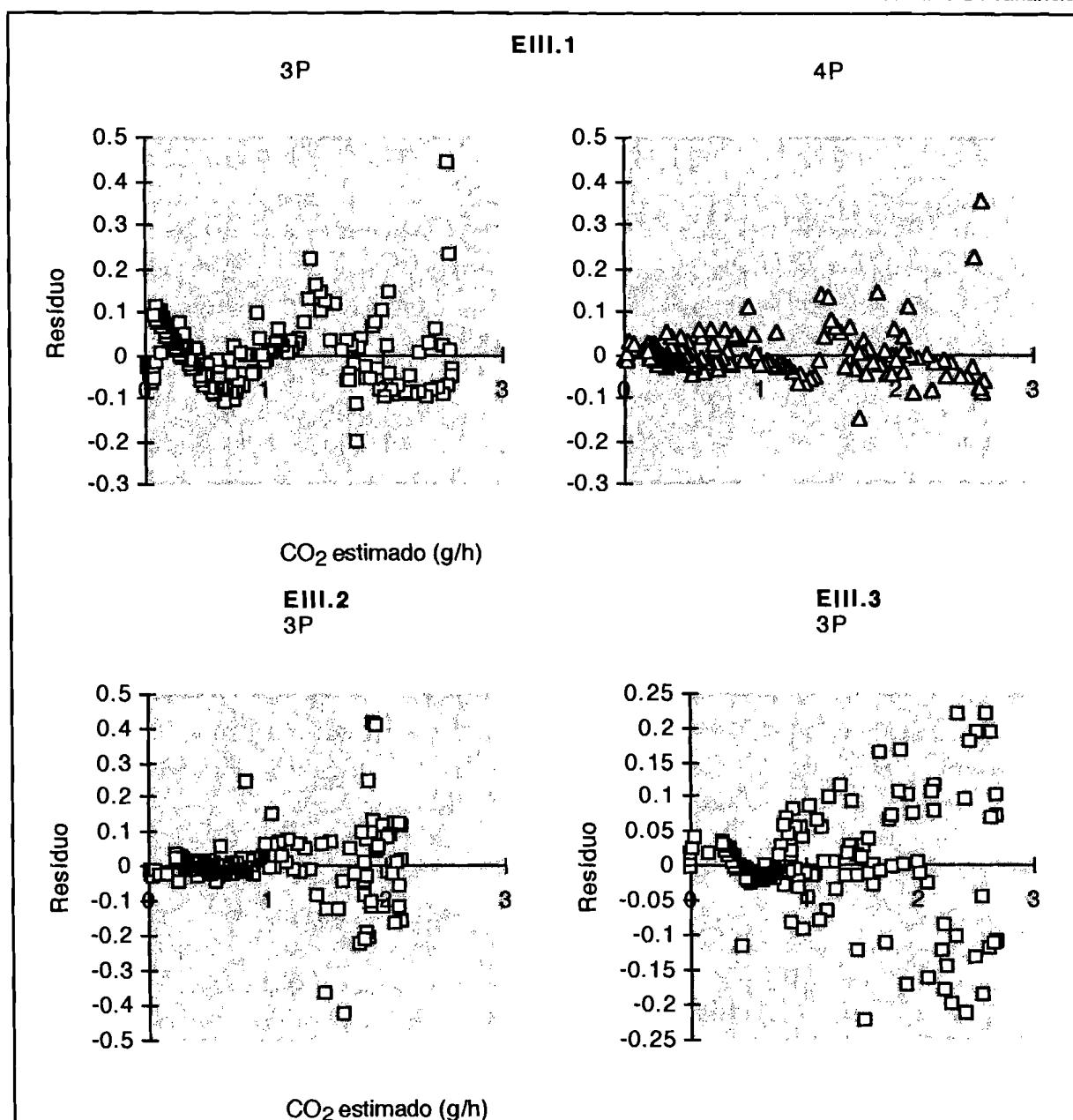


Figura A.II.3- Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO₂-
ensaios a 25-40°C

Quadro A.II.1- Balanço de nutrientes

Ensaio	Tempo (h)	CO ₂ ac (g Carbono)	RPS		RSV		Rcarbono		Razoto		C/N
			(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	
E.B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37.3
	36	21.9	55.0	15.4	53.4	17.2	23.6	15.5	0.0	0.0	30.3
	65	39.6	77.8	21.8	75.9	24.4	37.7	24.6	0.2	5.3	29.6
	88	45.6	88.9	24.9	88.0	28.3	43.6	28.5	0.2	5.3	28.1
	180	52.0	103.5	29.0	101.5	32.7	51.8	33.9	0.6	13.5	28.4
	180	55.2	106.4	29.8	104.6	33.7	52.1	34.1	0.6	14.3	28.6

Quadro A.II.2- Redução do substrato(*)

Ensaio	Tempo	RPS		RSV		RA		RH		RC		RL		CO ₂ ac RSV	RA+RH
	(h)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)		(g)
EI.3 (25°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	15	4.3	1.2	8.2	2.7	6.8	9.3	0	0					0.1	6.8
	23	11.0	3.1	11.2	3.6	6.2	8.5	0	0					0.7	6.2
	46	27.9	7.9	28.6	9.3	25.4	34.6	9.9	9.6					1.2	35.3
	94	58.0	16.5	59.1	19.1	60.3	82.4	32.4	31.2					1.5	92.7
	161	72.8	20.7	74.3	24.0	65.4	89.3	43.5	41.9	0		0.2		1.5	108.9
	190	77.4	22.0	80.1	25.9	66.1	90.2	45.6	43.9					1.5	111.7
EI.4 (25°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	33	22.6	6.3	22.6	7.3	16.2	21.0	4.3	4.6					1.1	20.5
	60	30.7	8.6	31.1	10.0	25.2	32.6	19.8	21.2					1.6	45.0
	88	40.1	11.3	41.6	13.4	41.3	53.4	22.2	23.8					1.7	63.5
	225	75.6	21.2	76.7	24.6	67.3	87.1	31.5	33.7					1.7	98.8
	225	79.6	22.3	81.3	26.1	68.5	88.5	29.5	31.6	0		1.1		1.6	98.0
	225	78.9	22.1	79.5	25.5	68.2	88.2	33.1	35.4					1.7	101.3
EII.4 (40°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	11	0	0	0	0	2.4	3.4	0	0					-	2.4
	19	0	0	2.7	0.9	5.3	7.7	10.7	11.6					-	16.0
	39	43.5	12.5	46.6	15.3	50.8	73.6	27.0	29.1					1.5	77.8
	64	61.5	17.6	66.4	21.8	61.7	89.3	25.3	27.3					1.7	87.0
	183	103.2	29.6	104.8	34.4	65.8	95.3	40.5	43.8	23.4	31.2	11.5	31.2	1.8	106.3
	183	101.7	29.2	104.5	34.3	66.1	95.7							1.7	
EIII.1 (25-40°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	37	32.0	8.9	32.4	10.3	29.0	40.0	30.7	26.1					1.4	59.7
	66	64.0	17.7	64.6	20.6	55.1	76.0	47.0	39.9					1.6	102.1
	137	88.6	24.6	89.3	28.4	66.5	91.7	56.6	48.1	0		10.1		1.7	123.1
	181	101.1	28.0	101.9	32.4	66.3	91.4	60.6	51.5					1.6	126.9
	181	100.0	27.7			68.5	94.5								
EIII.3 (25-40°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	18	14.6	4.1	13.8	4.4	13.0	17.3	0	0					0.5	13.0
	39	30.2	8.4	29.5	9.5	31.4	41.9	38.3	33.4					1.6	69.7
	62	57.5	16.1	57.7	18.5	60.4	80.5	44.0	38.4					1.8	104.4
	160	92.7	25.9	92.5	29.7	69.5	92.6	55.8	48.7	0		0		1.9	125.3
	160	100.7	28.2	100.2	32.2	70.7	94.2	57.5	50.1	0		0		1.8	128.2
	160	84.1	23.5	86.6	27.8	70.4	93.8	52.6	45.9					2.0	123.0
EII.7 (40°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	163	147.5	37.4	147.7	42.3	99.4	97.6	56.0	47.8	0	0	0	0	1.6	155.4
	163	155.9	39.5	154.2	44.1	98.8	97.0	64.9	55.4					1.5	163.7
	163	146.1	37.0	147.0	42.1	98.8	97.0	58.0	49.5	6.2	7.6	0	0	1.6	156.8
	163	140.6	35.6	141.2	40.4	98.9	97.1	58.2	49.7					1.7	157.1
E.A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	9	4.1	1.2	4.7	1.5	6.2	7.9	4.8	4.4					0.1	11.0
	29	45.3	12.8	47.7	15.3	56.8	72.8	43.0	39.4					1.2	99.8
	224	117.2	33.1	104.2	33.4	74.8	95.9	55.3	50.7					-	130.1
	224	118.2	33.3	119.5	38.3	74.2	95.1	57.7	52.9	13.7	16.3	0	0	1.7	131.9

(*) A redução de peso seco (RPS), de sólidos voláteis (RSV), de amido (RA), de hemicelulose (RH), de celulose (RC) ou de lenhina (RL) foi calculada com base nos resultados do quadro 5.3 e é a diferença entre o momento t=0h e o momento t expressa em gramas ou em percentagem do valor inicial

1- Síntese da formulação matemática do modelo CPK (Hamelers,1993)

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = r_{S_m} + D_{S_m} \frac{\partial^2 S_m}{\partial x^2} - S_m \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial O_2}{\partial t} = r_{O_2} + D_{O_2} \frac{\partial^2 O_2}{\partial x^2} - O_2 \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial S_p}{\partial t} = r_{S_p} - S_p \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial X_m}{\partial t} = r_{X_m} - X_m \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{r_{X_m}}{\rho_{X_m}} + \frac{r_{S_p}}{\rho_{S_p}} + \frac{r_w}{\rho_w}$$

$$W = \frac{\left(1 - \frac{X_m}{\rho_{X_m}} - \frac{S_p}{\rho_{S_p}} \right)}{\rho_w}$$

onde:

S_m - substrato monomérico (concentração)

S_p - substrato polimérico (concentração)

X_m - biomassa (concentração)

O_2 - oxigénio (concentração)

W - água (concentração)

V - volume livre

D_i - coeficiente de difusão da espécie i

ρ_i - massa específica da espécie i

r_i - taxa de conversão da espécie i por unidade de volume

2- Síntese da formulação matemática do modelo de compostagem desenvolvido por Kaiser (1996)

$$\frac{dm_{CO_2}}{dt} = \frac{dm_{CO_2}^{bio}}{dt} - m_{CO_2} \frac{dV_{sd}}{dt} / V$$

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = \frac{dm_{H_2O}^{bio}}{dt} + \frac{dm_{H_2O}^{entr}}{dt} - \frac{dm_{H_2O}^{sd}}{dt}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{bio}}{dt} - \frac{dQ_{amb}}{dt} + \frac{dQ_{entr}}{dt} - \frac{dQ_{sd}}{dt}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} / (C_r + C_{mat} + C_{ar})$$

$$\frac{dx_i}{dt} = \mu_i x_i$$

$$\mu_i = \mu_{max,j} f_{temp} \frac{S_j}{K_{s,j} + S_j} - \delta$$

onde:

$$S_1 = s_1 \quad S_2 = s_1 + s_2 \quad S_3 = S_4 = s_1 + s_2 + s_3$$

$$\frac{ds_1}{dt} = -\frac{1}{Y} \left(\frac{dx_1}{dt} + \frac{s_1}{s_1 + s_2} \frac{dx_2}{dt} + \frac{s_1}{s_1 + s_2 + s_3} \frac{dx_3}{dt} + \frac{s_1}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \frac{dx_4}{dt} \right)$$

.....

$$\frac{ds_3}{dt} = -\frac{1}{Y} \left(\frac{s_3}{s_1 + s_2 + s_3} \frac{dx_3}{dt} + \frac{s_4}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \frac{dx_4}{dt} \right)$$

$$\frac{ds_4}{dt} = -\frac{1}{Y} \left(\frac{s_4}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \frac{dx_4}{dt} \right)$$

$$\frac{dm_{CO_2}^{bio}}{dt} = c_c \frac{PM_{CO_2}}{PM_c} (Y - 1) \left(\frac{ds_1}{dt} + \frac{ds_2}{dt} + \frac{ds_3}{dt} + \frac{ds_4}{dt} \right) M$$

$$M = \sum m_i + \sum m_j + m_{húmica} + m_{mineral} + m_{H_2O}$$

onde:

m - massa

Q - quantidade de calor

V - volume livre no substrato

T - temperatura

bio - produção metabólica

$entr$ - entrada

sd - saída

amb - ambiente

C_r - capacidade calorífica do reactor

C_{mat} - capacidade calorífica do substrato

C_{ar} - capacidade calorífica do ar

μ_i - taxa específica de crescimento do microrganismo i

f_i^{temp} - coeficiente de dependência do crescimento do microrganismo i da temperatura

S_j - concentração total dos substratos referentes ao organismo i

K_{sj} - constante de saturação do microrganismo i

δ - taxa de morte

x_i - concentração do microrganismo i

i - microrganismo ($i=1$ =bactérias, $i=2$ =actinomicetes, $i=3$ =fungos "castanhos", $i=4$ =fungos "brancos")

S_j - concentração do substrato j

j - substrato ($j=1$ =glúcidos simples e amido, $j=2$ =hemicelulose, $j=3$ =celulose, $j=4$ =lenhina)

Y - coeficiente de rendimento

c_c - concentração de carbono do substrato

PM - peso molecular

M - massa do substrato em compostagem

c - carbono

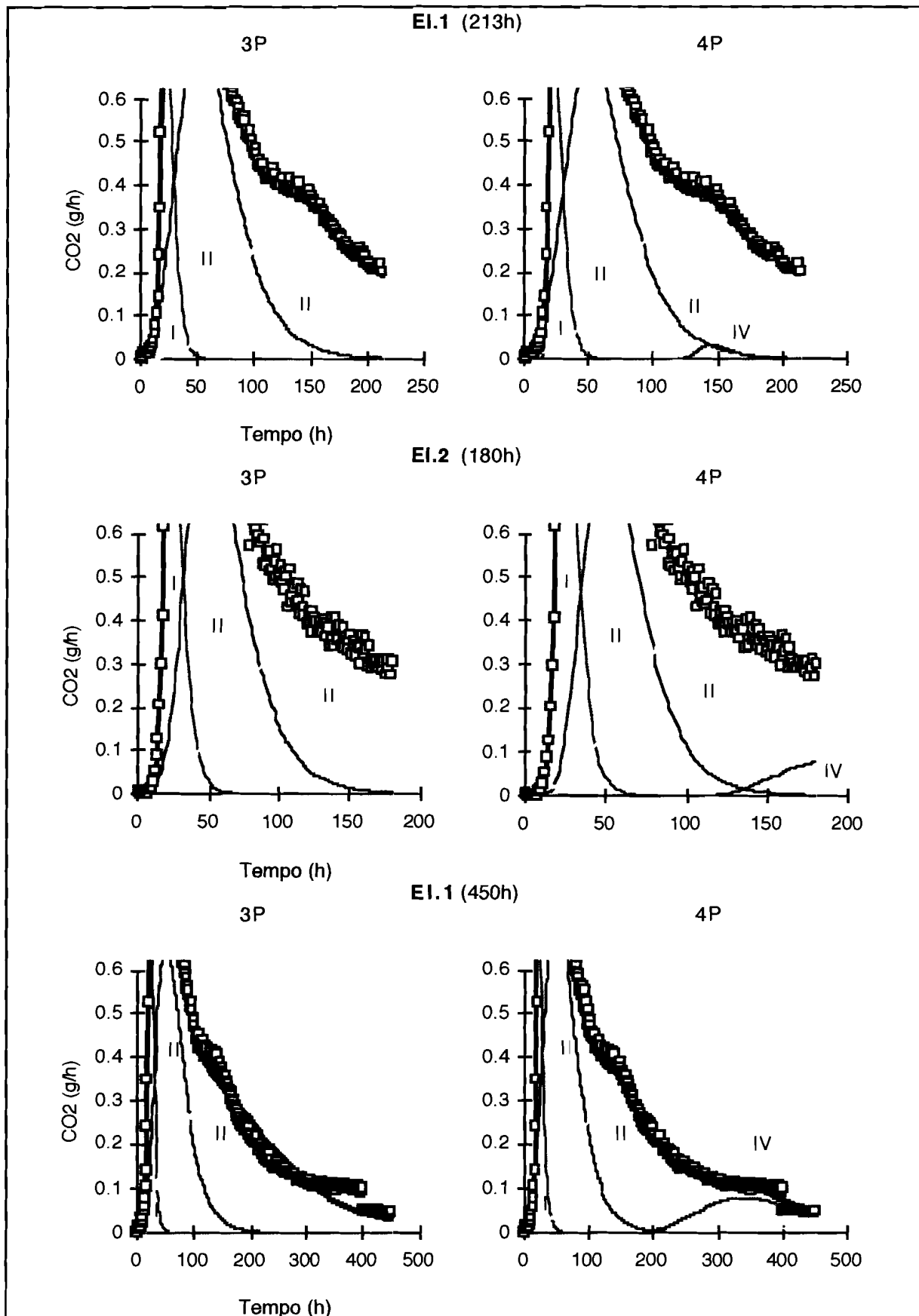


Figura A.I.1- Modelo cinético de compostagem (ensaio a 25°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

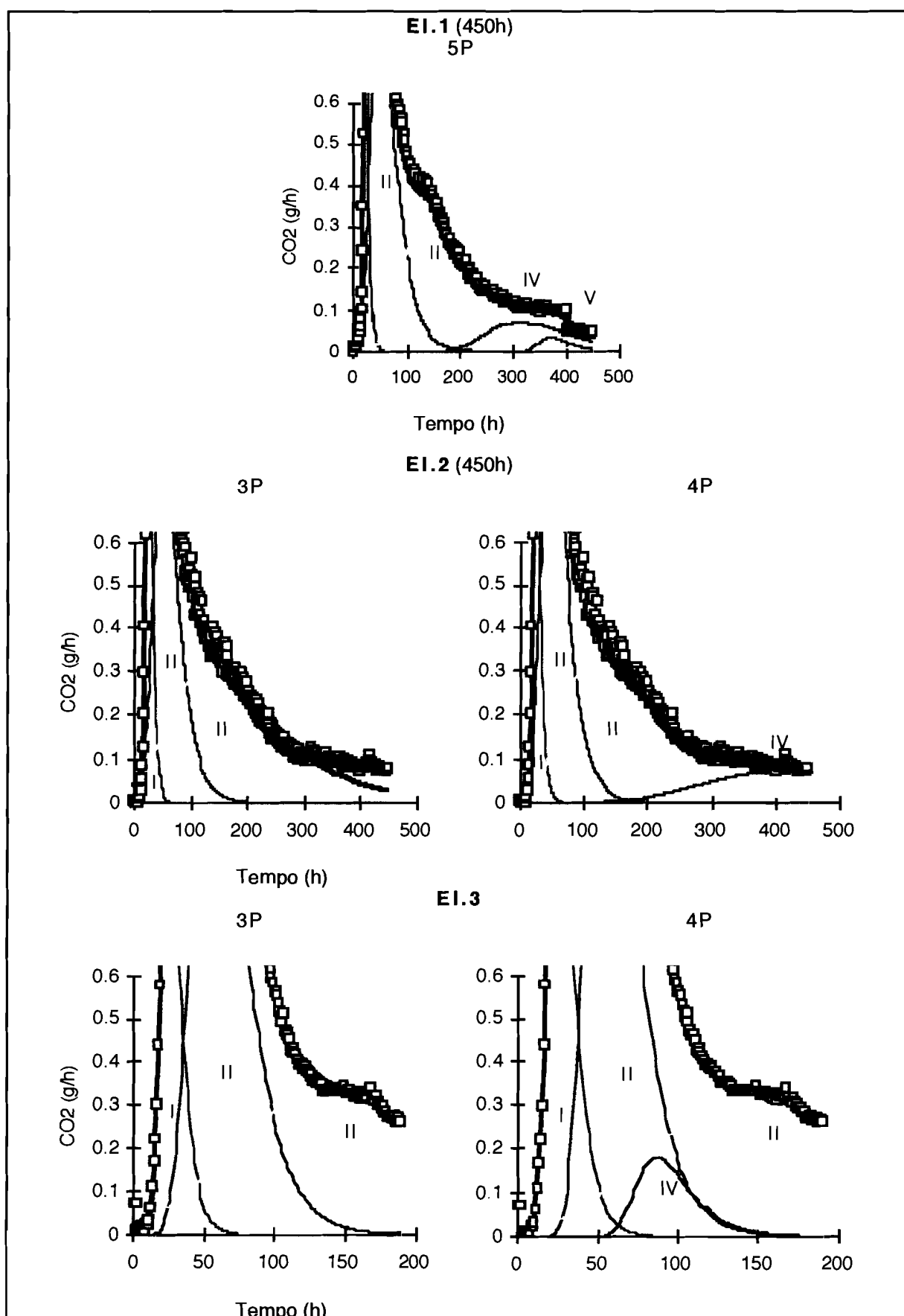


Figura A.I.1- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

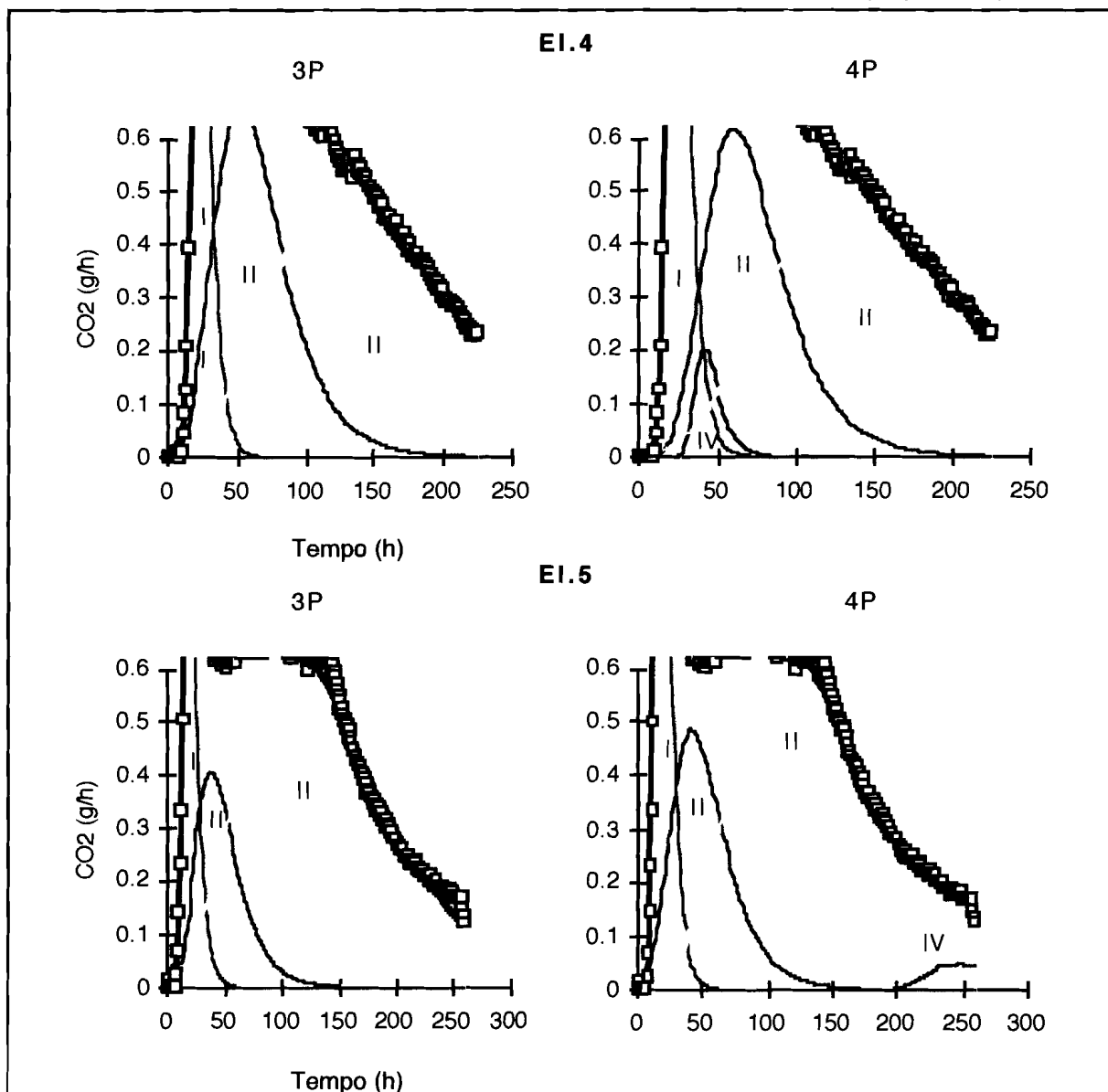


Figura A.I.1- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

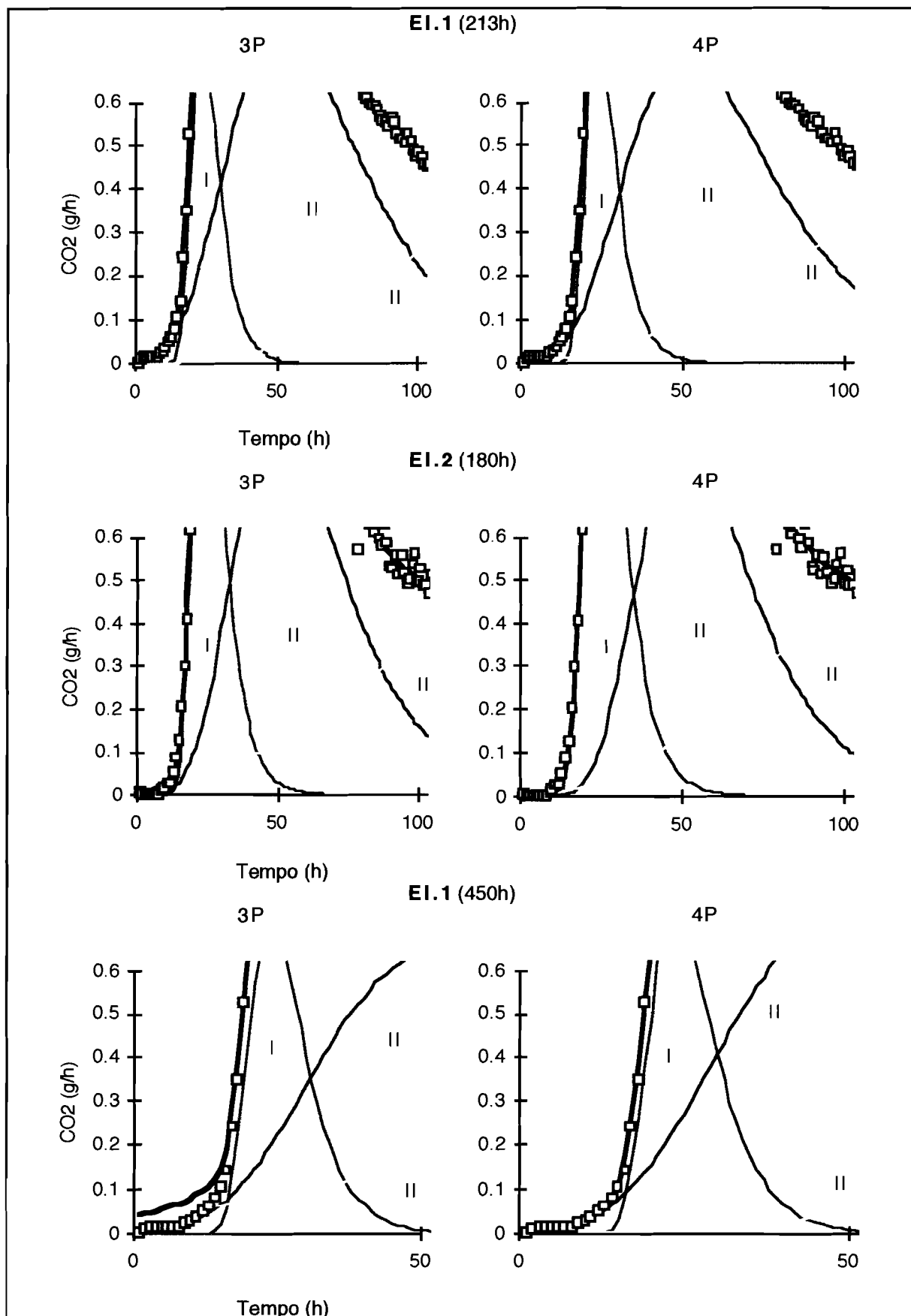


Figura A.I.2- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios^(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

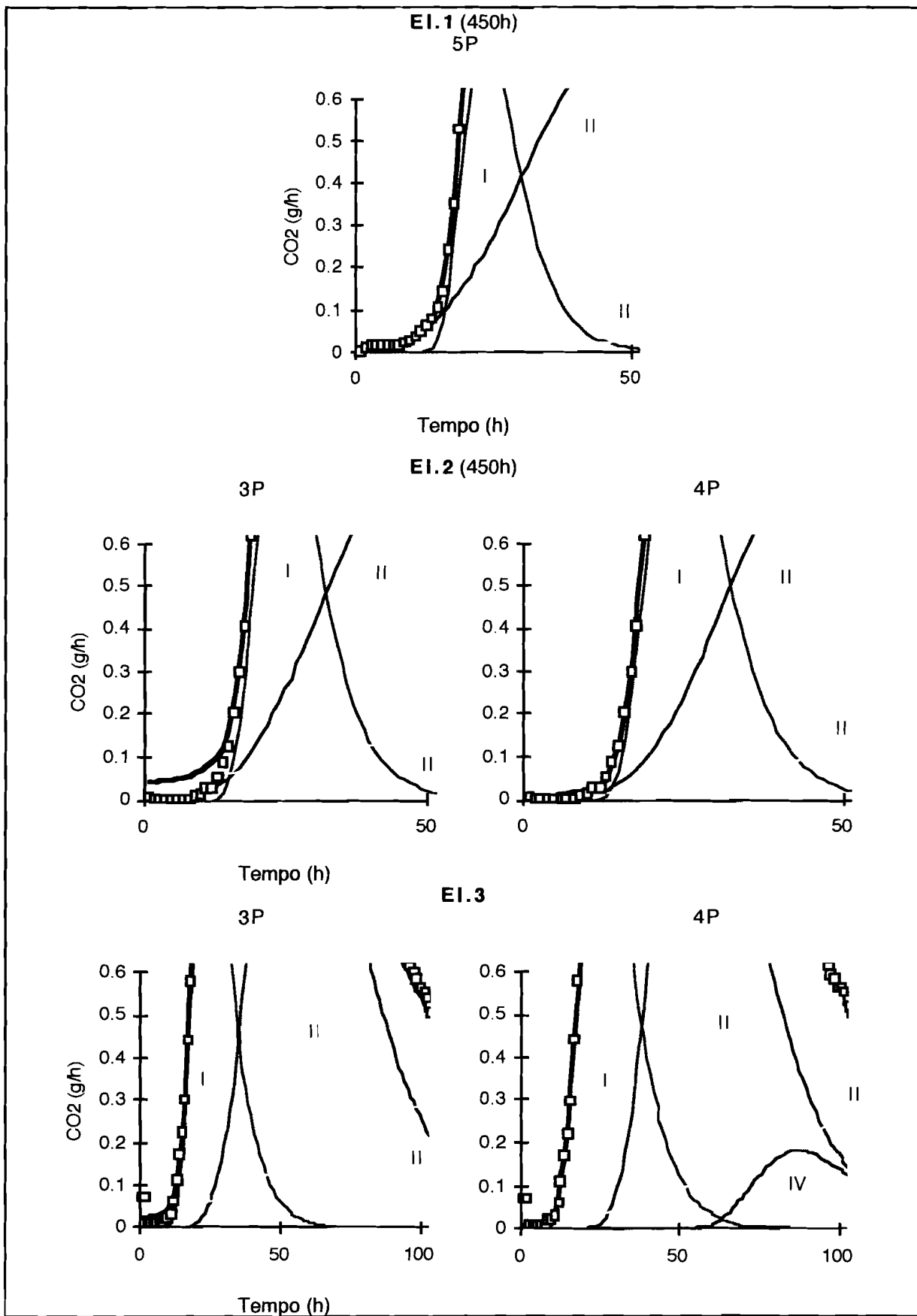


Figura A.1.2- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

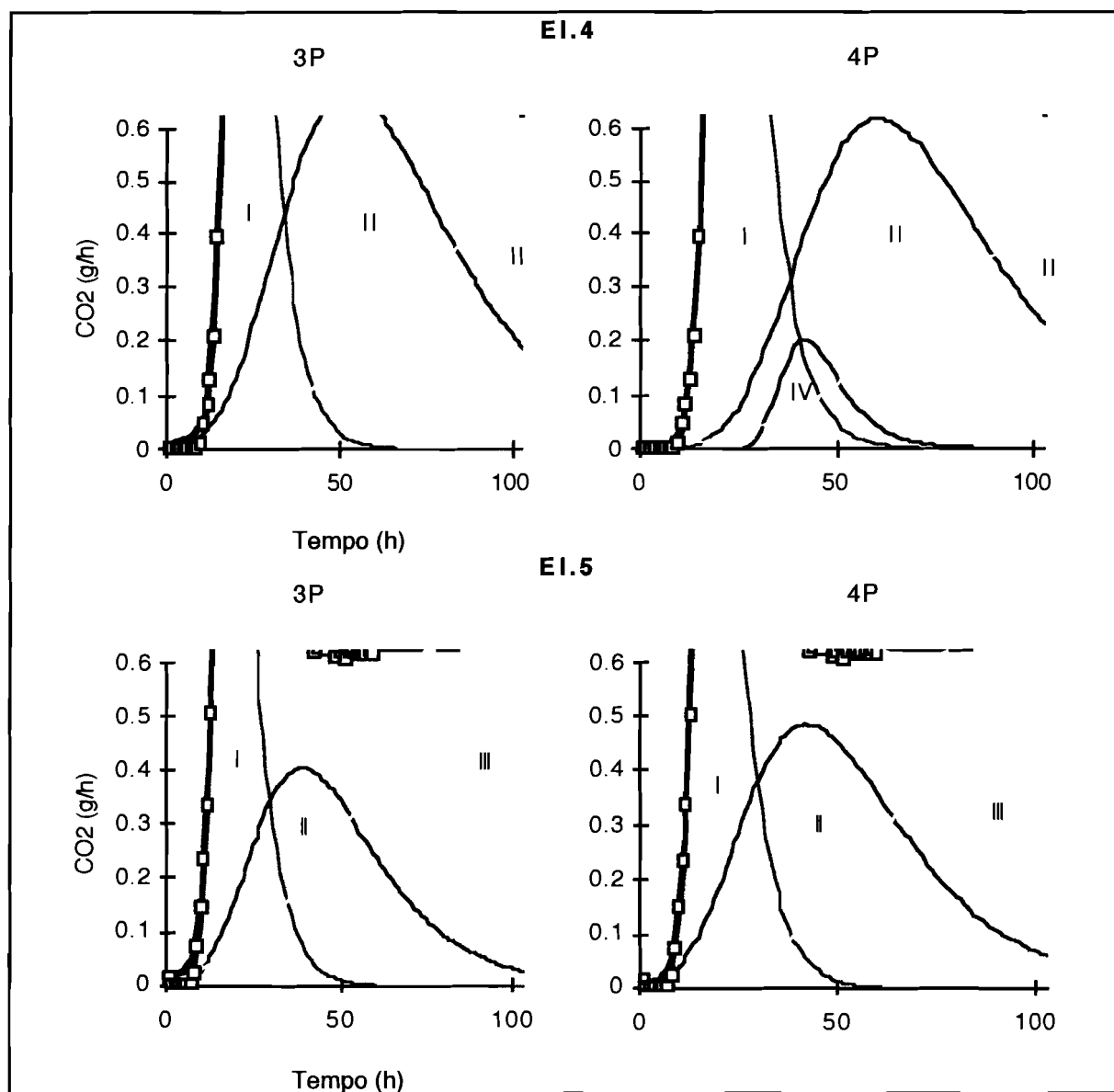


Figura A.I.2- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

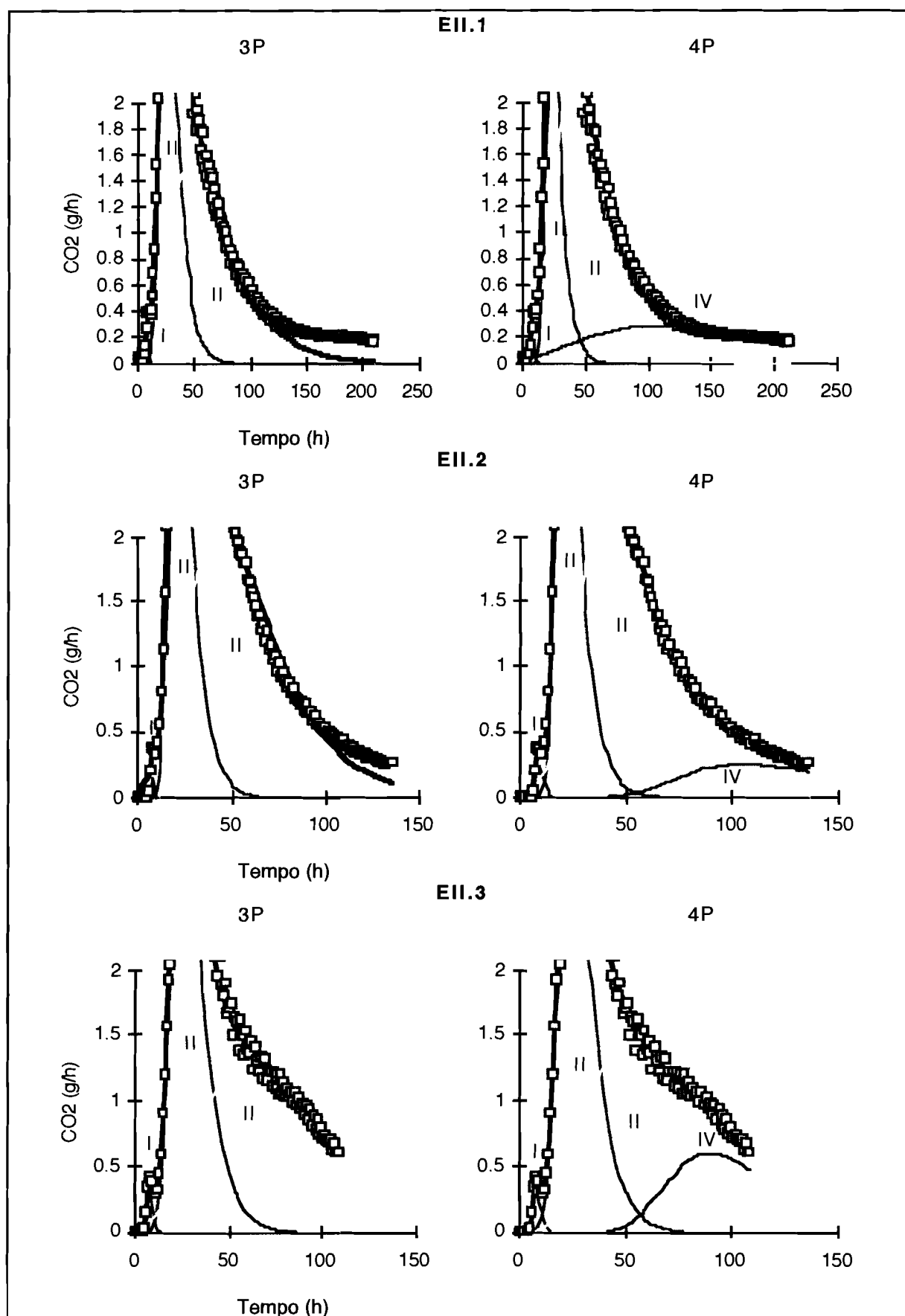


Figura A.I.3- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

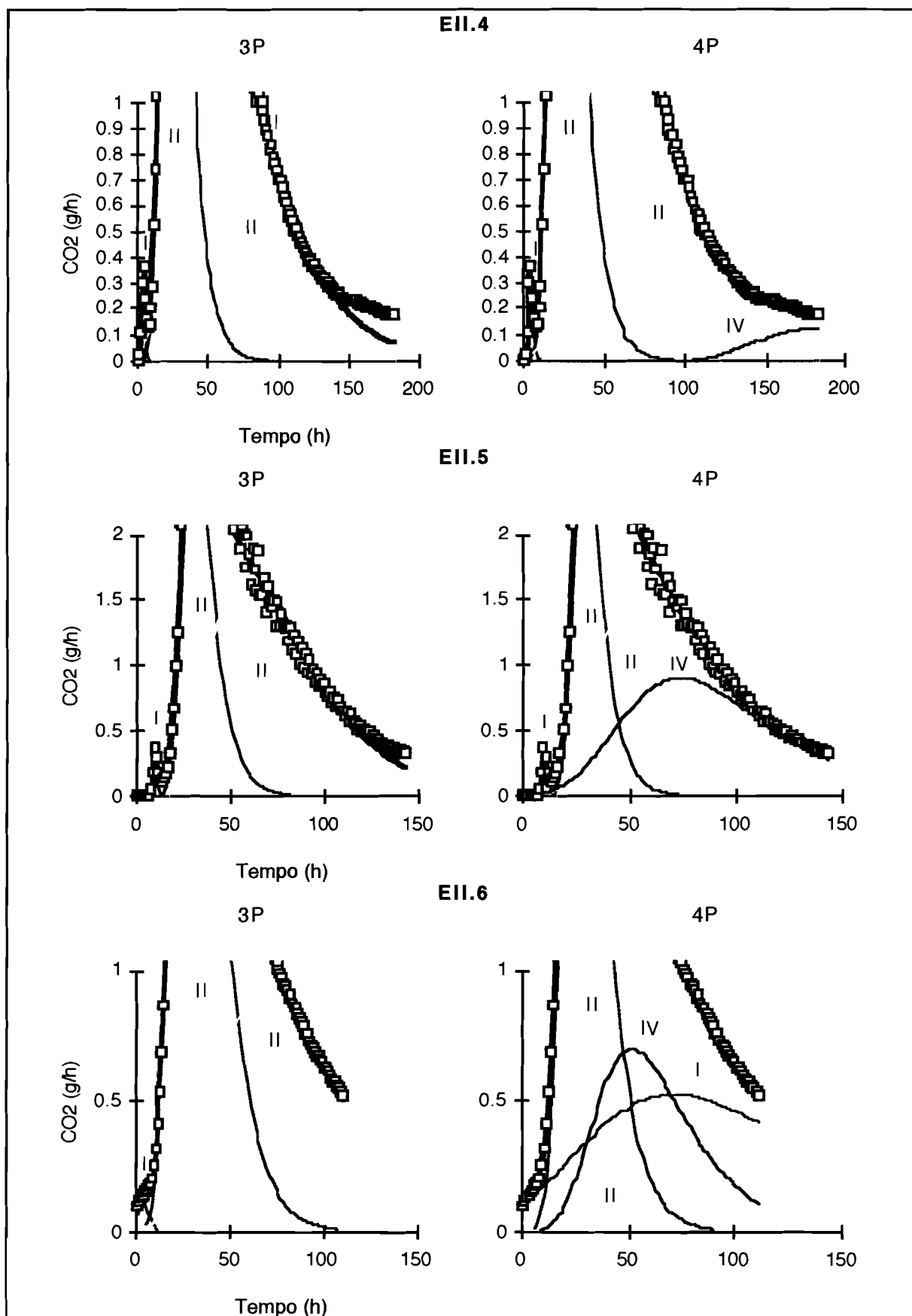


Figura A.I.3- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios^(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

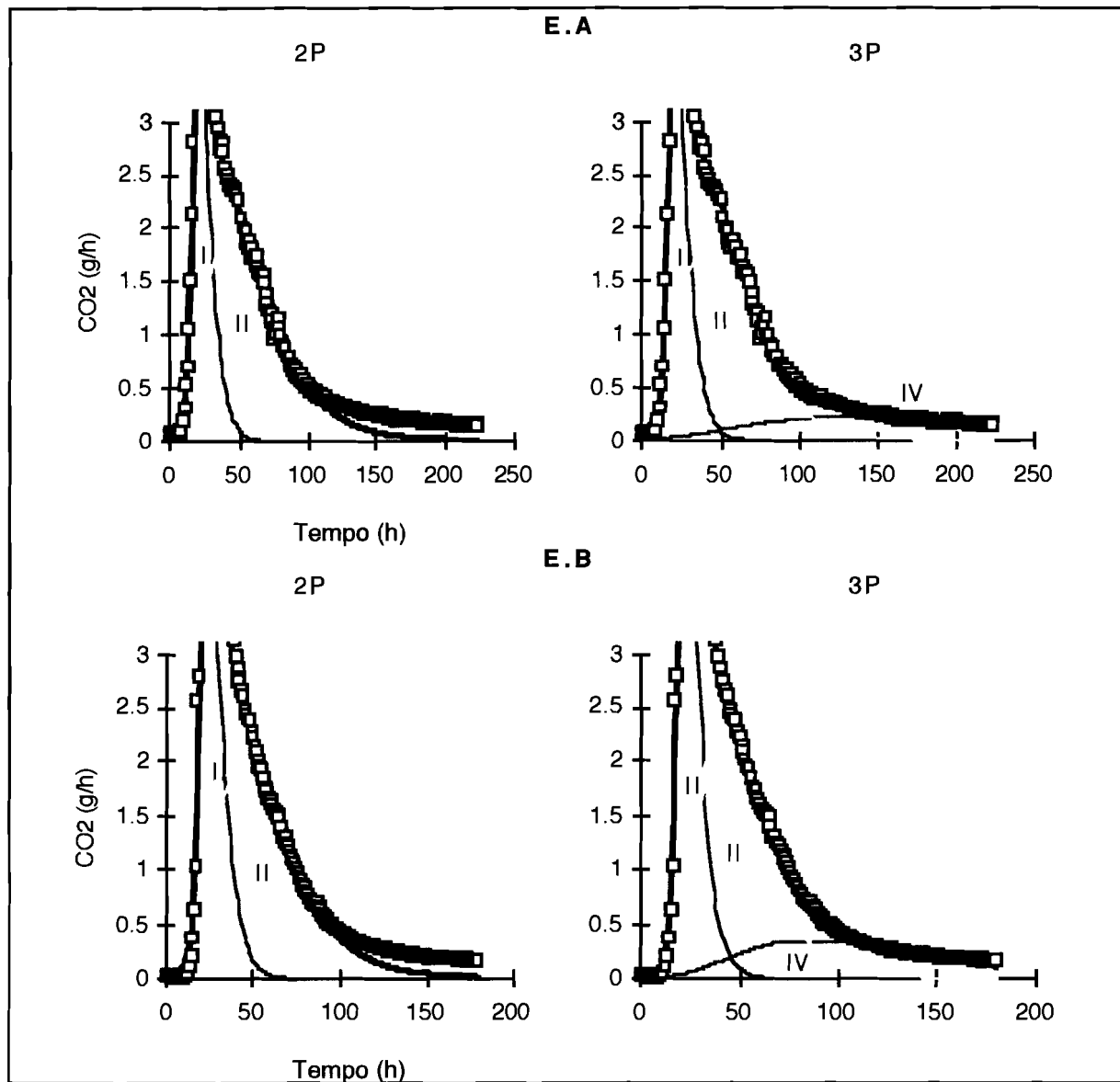


Figura A.I.3- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios^(*)

^(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

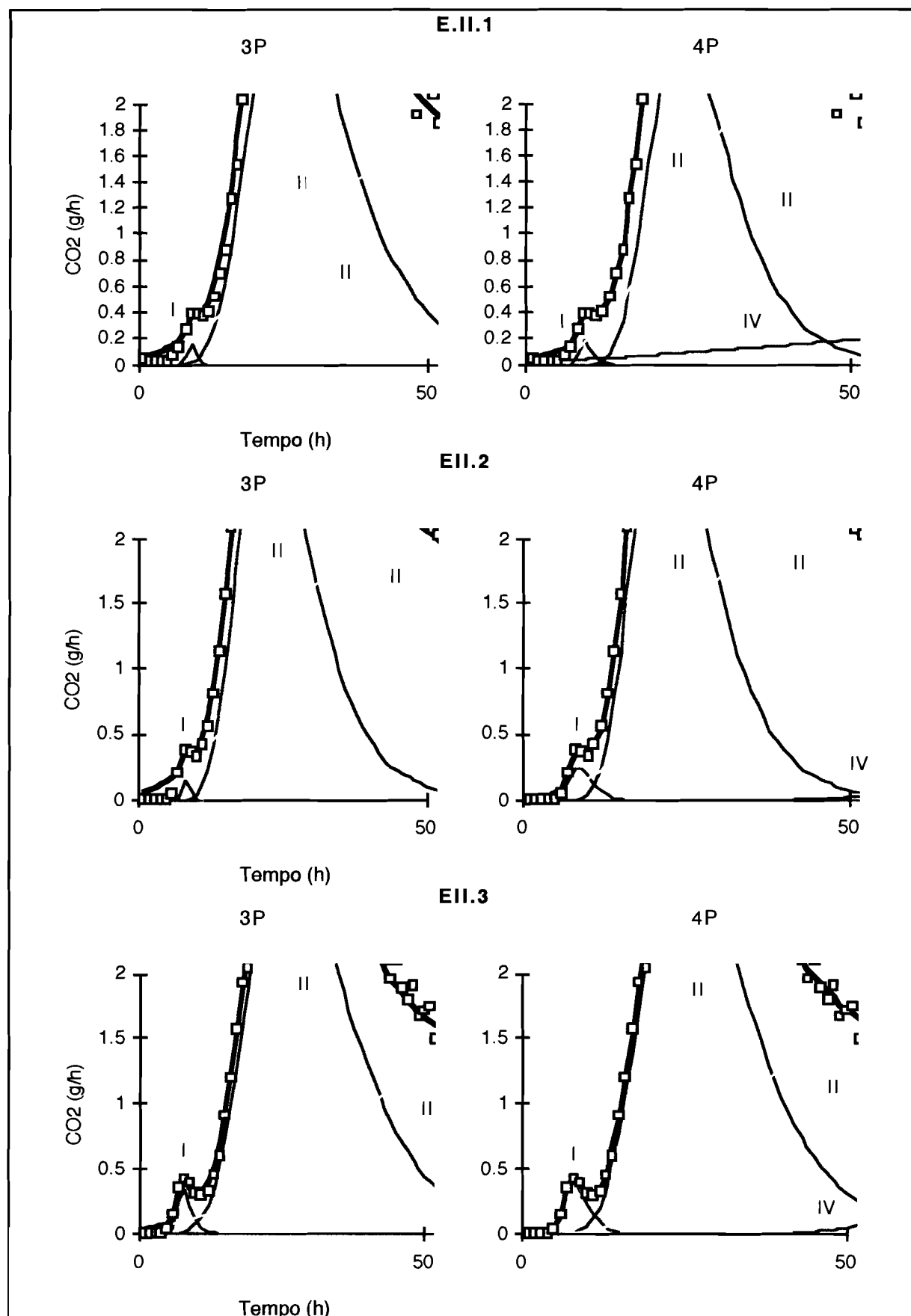


Figura A.I.4- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios^(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

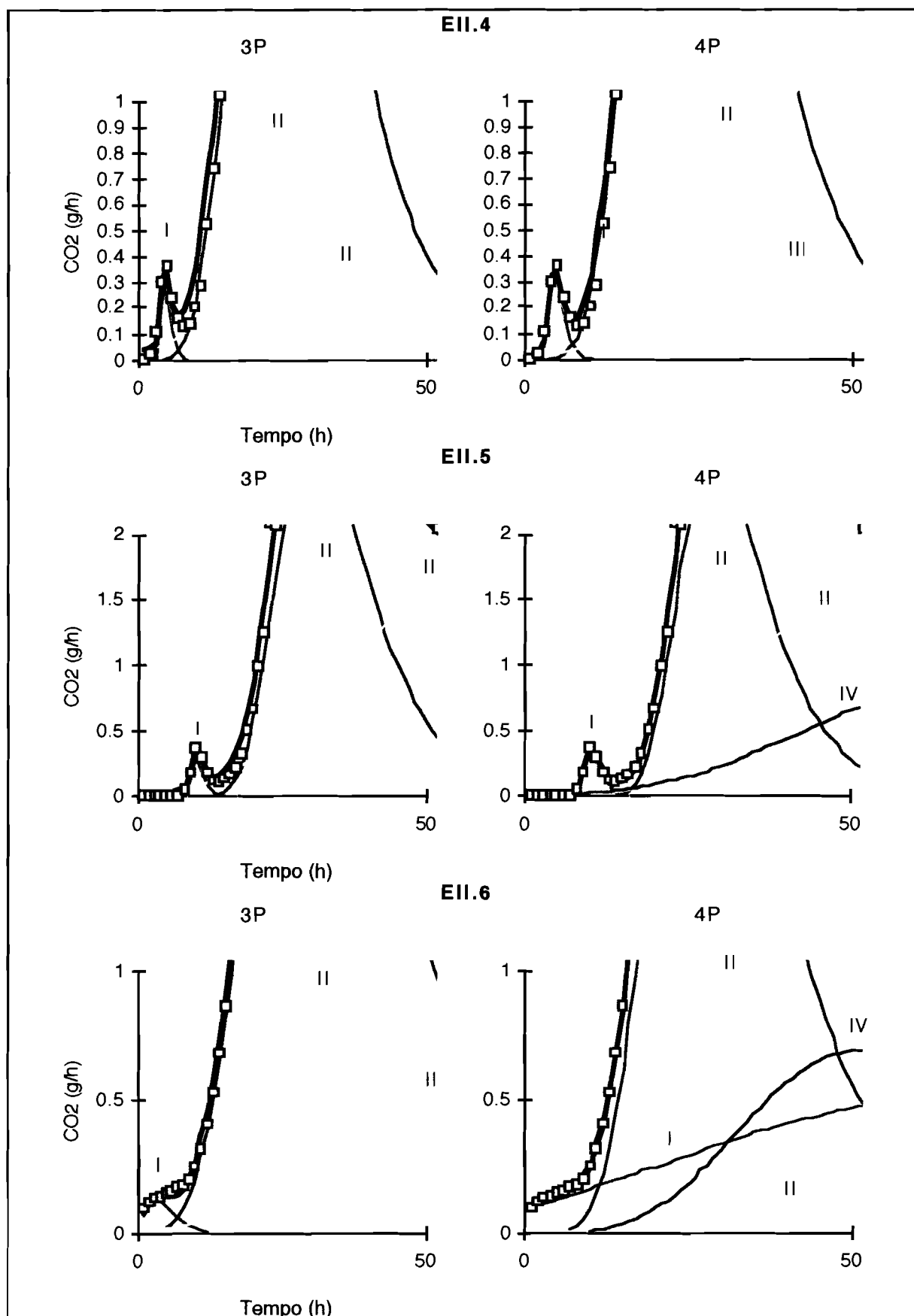


Figura A.I.4- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios^(*) (continua)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

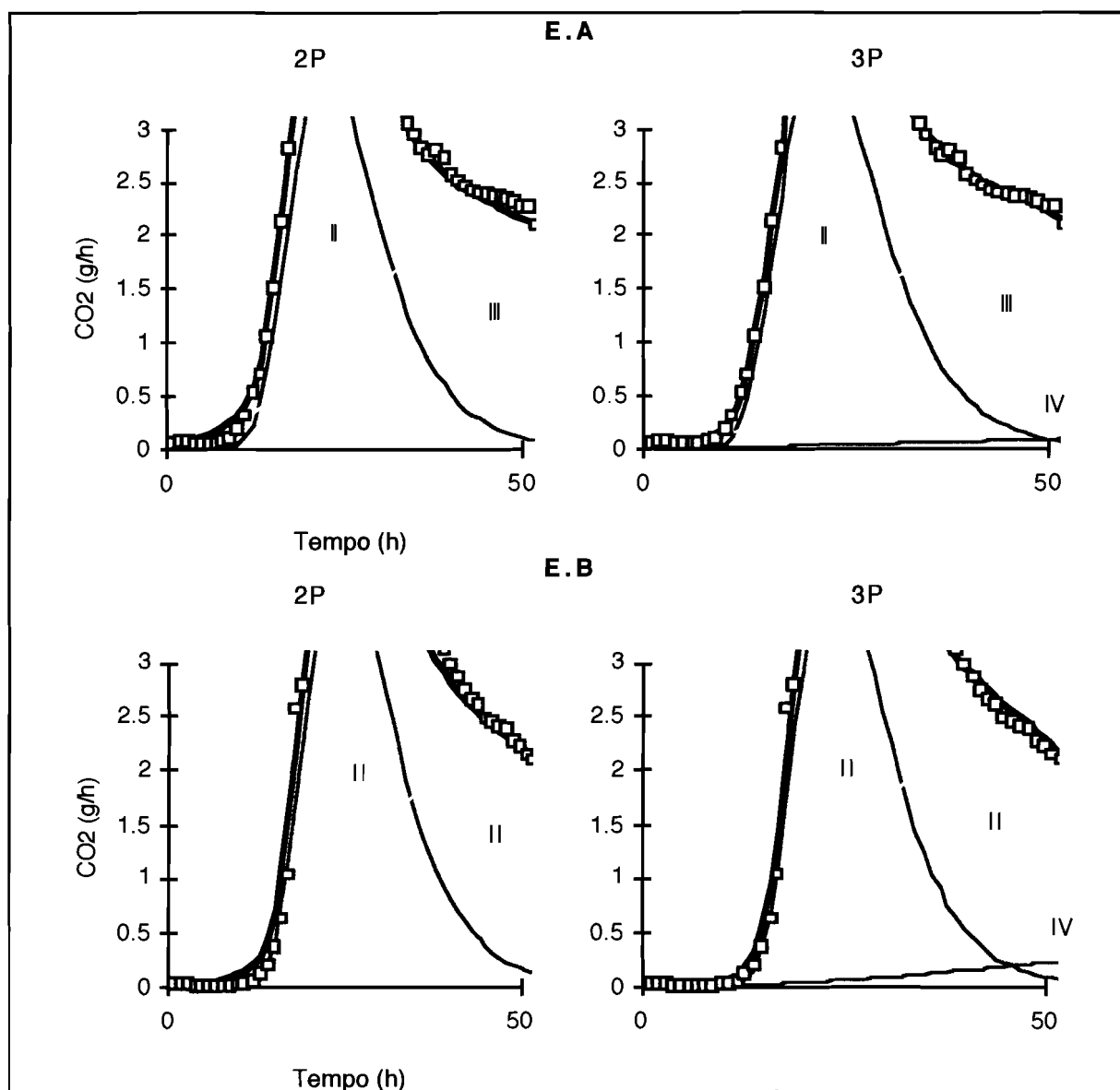


Figura A.I.4- Modelo cinético de compostagem (ensaio a 40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

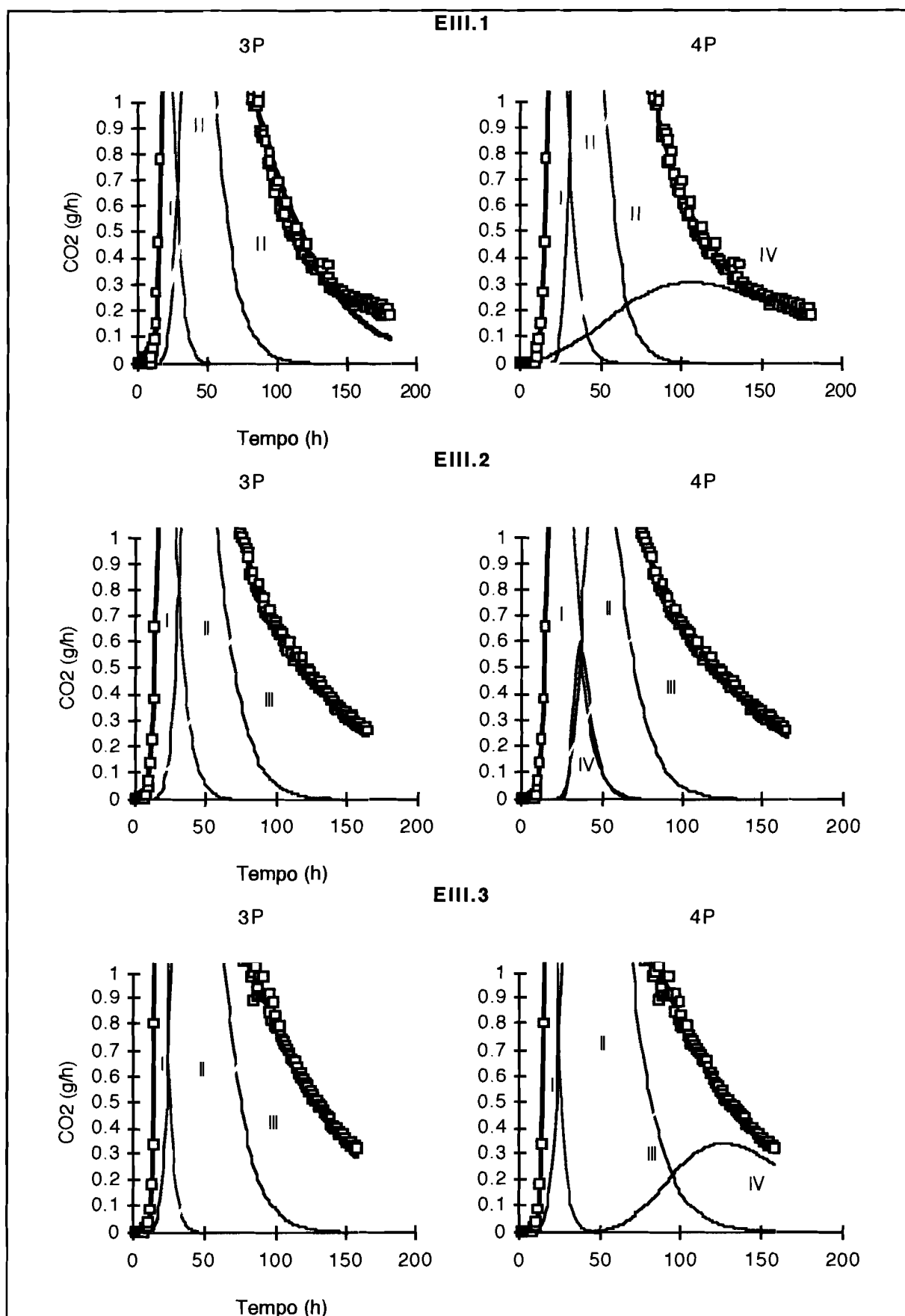


Figura A.I.5- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25-40°C): pormenor do ajuste no fim dos ensaios^(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

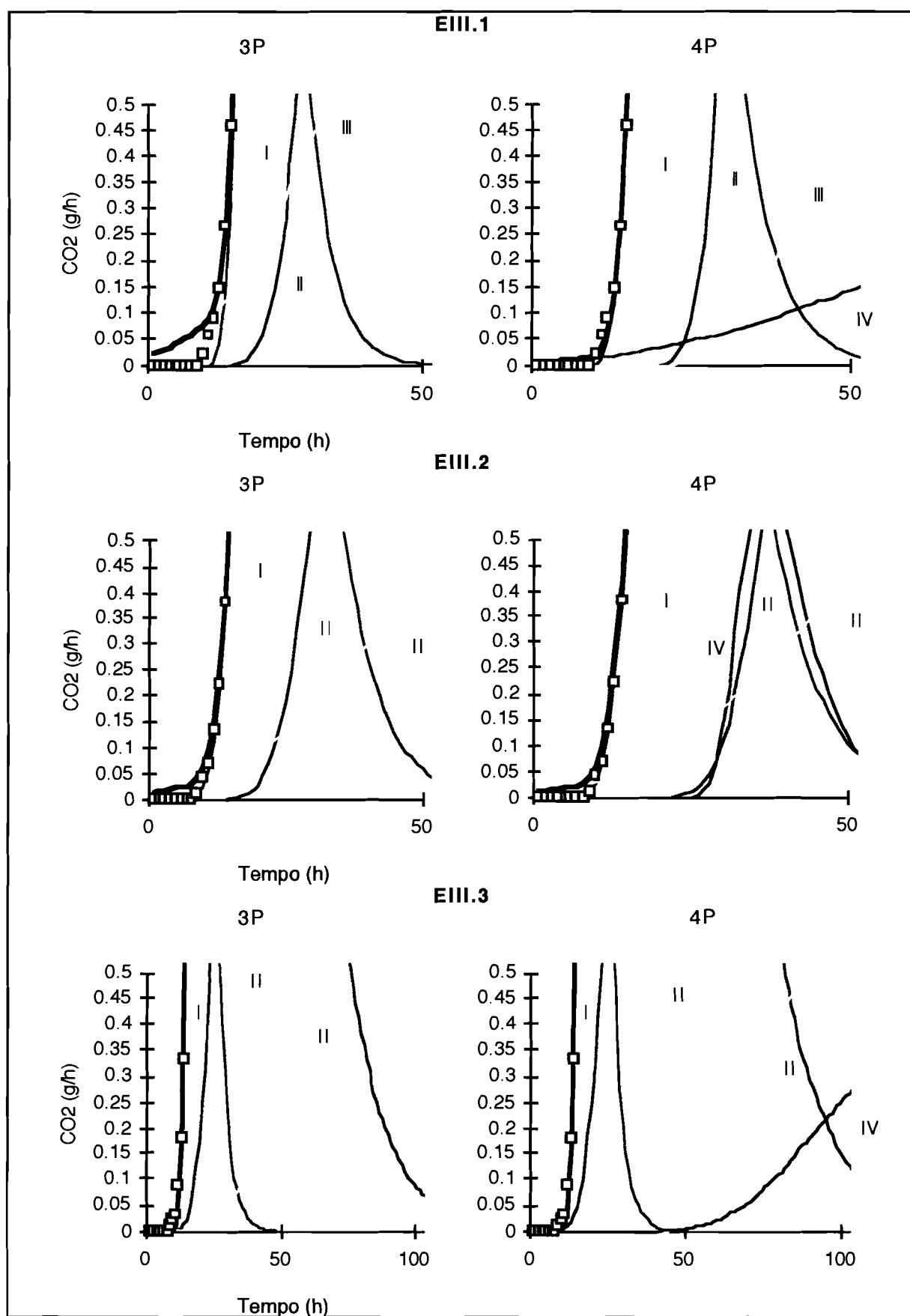


Figura A.I.6- Modelo cinético de compostagem (ensaios a 25-40°C): pormenor do ajuste no início dos ensaios^(*)

(*) As marcas representam o CO₂ observado e a linha a cheio espessa o CO₂ estimado pelo modelo

Quadro A.I.1- Ensaio El.1 (213h) uma população

	GL	S Q	MSQ
Regressão	3	52.7729	17.5910
Resíduo	210	4.2726	0.0204
Total (não corrigido)	213	57.0455	
Total (corrigido)	212	12.2661	

$$r^2 = 0.652$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	103.35	2.852	97.724	108.969
LI	11.00	2.262	6.538	15.458
KI	0.76	0.019	0.724	0.800

Quadro A.I.2- Ensaio El.1 (213h) duas populações

	GL	S Q	MSQ
Regressão	6	55.5115	9.2519
Resíduo	207	1.5340	0.0074
Total (não corrigido)	213	57.0455	
Total (corrigido)	212	12.2661	

$$r^2 = 0.875$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	36.09	10.917	14.572	57.617
AII	72.87	13.086	47.068	98.664
LI	17.59	1.477	14.683	20.505
LII	44.28	19.233	6.366	82.202
KI	0.72	0.130	0.460	0.972
KII	0.45	0.040	0.374	0.531

Quadro A.I.3- Ensaio EI.1 (213h) três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	57.0075	6.3342
Resíduo	204	0.0380	0.0002
Total (não corrigido)	213	57.0455	
Total (corrigido)	212	12.2661	

$$r^2 = 0.997$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.69	0.265	9.173	10.216
AII	48.42	1.669	45.133	51.715
AIII	51.98	2.023	47.987	55.965
LI	18.82	0.073	18.675	18.962
LII	28.64	0.369	27.916	29.370
LIII	80.58	3.610	73.463	87.698
KI	0.74	0.011	0.717	0.761
KII	0.76	0.013	0.739	0.789
KIII	0.33	0.005	0.322	0.341

Quadro A.I.4- Ensaio EI.1 (213h) quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	57.0144	4.7512
Resíduo	201	0.0311	0.0002
Total (não corrigido)	213	57.0455	
Total (corrigido)	212	12.2661	

$$r^2 = 0.995$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.71	0.359	9.002	10.419
AII	43.07	4.054	35.075	51.062
AIII	58.17	4.419	49.460	66.886
AIV	0.98	0.268	0.450	1.507
LI	18.82	0.072	18.679	18.963
LII	28.65	0.722	27.228	30.076
LIII	65.59	8.914	48.017	83.171
LIV	133.41	2.258	128.960	137.864
KI	0.74	0.015	0.711	0.771
KII	0.70	0.039	0.629	0.781
KIII	0.33	0.010	0.309	0.350
KIV	0.03	0.005	0.021	0.040

Quadro A.I.5- Ensaio EI.2 (180h) uma população

	GL	SQ	MSQ
Regressão	3	69.6798	23.2266
Resíduo	177	6.4846	0.0366
Total (não corrigido)	180	76.1644	
Total (corrigido)	179	19.0102	

$$r^2 = 0.659$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	102.05	3.096	95.944	108.165
LI	14.31	1.756	10.846	17.776
KI	1.01	0.030	0.952	1.068

Quadro A.I.6- Ensaio EI.2 (180h) duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	73.9845	12.3307
Resíduo	174	2.1800	0.0125
Total (não corrigido)	180	76.1644	
Total (corrigido)	179	19.0102	

$$r^2 = 0.885$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	34.94	7.026	21.070	48.803
AII	76.05	8.430	59.410	92.686
LI	18.30	1.038	16.256	20.352
LII	35.79	9.529	16.987	54.602
KI	0.94	0.108	0.723	1.148
KII	0.59	0.039	0.512	0.667

Quadro A.I.7- Ensaio EI.2 (180h) três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	75.8973	8.4330
Resíduo	171	0.2671	0.0016
Total (não corrigido)	180	76.1644	
Total (corrigido)	179	19.0102	

$$r^2 = 0.986$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	15.79	1.767	12.304	19.280
AII	44.72	6.181	32.519	56.920
AIII	61.73	6.340	49.219	74.248
LI	18.79	0.150	18.498	19.091
LII	31.00	2.086	26.883	35.117
LIII	61.35	10.691	40.249	82.455
KI	1.02	0.065	0.897	1.152
KII	0.86	0.058	0.741	0.972
KIII	0.36	0.019	0.325	0.399

Quadro A.I.8- Ensaio EI.2 (180h) quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	75.9034	6.3353
Resíduo	168	0.2610	0.0016
Total (não corrigido)	180	76.1644	
Total (corrigido)	179	19.0102	

$$r^2 = 0.986$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	18.35	1.998	14.401	22.291
AII	38.22	6.940	24.515	51.917
AIII	54.18	9.145	36.130	72.238
AIV	7.22	14.338	-21.082	35.529
LI	18.73	0.158	18.416	19.039
LII	33.41	1.928	29.603	37.217
LIII	56.87	10.833	35.479	78.253
LIV	150.72	13.782	123.508	177.923
KI	1.12	0.067	0.985	1.250
KII	0.82	0.077	0.672	0.975
KIII	0.39	0.031	0.329	0.453
KIV	0.08	0.079	-0.079	0.233

Quadro A.I.9- Ensaio El.1 (450h) uma população

	GL	SQ	MSQ
Regressão	3	54.2880	18.0960
Resíduo	447	5.8909	0.0132
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.777$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	115.63	2.592	110.533	120.723
LI	3.81	2.452	-1.012	8.628
KI	0.71	0.014	0.678	0.734

Quadro A.I.10- Ensaio El.1 (450h) duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	58.1495	9.6916
Resíduo	444	2.0294	0.0046
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.923$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	45.65	7.492	30.927	60.375
AII	77.40	8.903	59.901	94.897
LI	18.15	1.389	15.419	20.877
LII	44.55	18.084	9.006	80.087
KI	0.73	0.068	0.591	0.860
KII	0.34	0.023	0.298	0.388

Quadro A.I.11- Ensaio El.1 (450h) três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	59.8372	6.6486
Resíduo	441	0.3417	0.0008
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.987$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.22	0.599	8.040	10.395
AII	41.80	2.804	36.288	47.309
AIII	73.34	2.781	67.871	78.802
LI	19.06	0.149	18.770	19.357
LII	29.09	1.354	26.432	31.755
LIII	48.96	5.868	37.425	60.491
KI	0.71	0.024	0.660	0.754
KII	0.65	0.020	0.605	0.686
KIII	0.30	0.009	0.285	0.319

Quadro A.I.12- Ensaio El.1 (450h) quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	60.1164	5.0097
Resíduo	438	0.0625	0.0001
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.998$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.70	0.235	9.236	10.159
AII	47.68	1.737	44.263	51.092
AIII	52.92	2.275	48.447	57.392
AIV	16.96	0.970	15.055	18.869
LI	18.81	0.064	18.689	18.940
LII	28.61	0.327	27.963	29.249
LIII	78.74	3.829	71.217	86.269
LIV	259.84	4.990	250.036	269.651
KI	0.74	0.010	0.720	0.759
KII	0.76	0.015	0.729	0.786
KIII	0.33	0.005	0.323	0.342
KIV	0.08	0.002	0.074	0.084

Quadro A.I.13- Ensaio EI.1 (450h) cinco populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	15	60.1283	4.0086
Resíduo	435	0.0506	0.0001
Total (não corrigido)	450	60.1789	
Total (corrigido)	449	26.4251	

$$r^2 = 0.998$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	9.70	0.296	9.298	10.108
AII	49.77	1.382	47.049	52.483
AIII	49.28	2.094	45.169	53.399
AIV	14.28	1.848	10.650	17.912
AV	2.58	0.787	1.033	4.127
LI	18.82	0.057	18.710	18.936
LII	28.75	0.296	28.173	29.337
LIII	83.82	3.054	77.818	89.821
LIV	239.57	5.845	228.078	251.055
LV	344.13	3.326	337.594	350.668
KI	0.74	0.009	0.722	0.755
KII	0.78	0.010	0.756	0.797
KIII	0.33	0.004	0.321	0.337
KIV	0.07	0.004	0.064	0.080
KV	0.03	0.005	0.024	0.045

Quadro A.I.14- Ensaio EI.2 (450h) uma população

	GL	SQ	MSQ
Regressão	3	71.4329	23.8110
Resíduo	447	10.2239	0.0229
Total (não corrigido)	450	81.6568	
Total (corrigido)	449	40.3329	

$$r^2 = 0.747$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	115.31	2.812	109.789	120.840
LI	9.11	1.904	5.368	12.854
KI	0.92	0.021	0.880	0.963

Quadro A.I.15- Ensaio EI.2 (450h) duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	78.7079	13.1180
Resíduo	444	2.9489	0.0066
Total (não corrigido)	450	81.6568	
Total (corrigido)	449	40.3329	

$$r^2 = 0.927$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	53.82	5.918	42.191	65.452
AII	81.02	7.361	66.550	95.485
LI	18.51	0.927	16.691	20.334
LII	43.41	14.437	15.032	71.779
KI	1.00	0.060	0.880	1.114
KII	0.37	0.018	0.338	0.410

Quadro A.I.16- Ensaio EI.2 (450h) três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	81.0626	9.0070
Resíduo	441	0.5942	0.0013
Total (não corrigido)	450	81.6568	
Total (corrigido)	449	40.3329	

$$r^2 = 0.985$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	13.72	1.241	11.276	16.154
AII	47.04	3.352	40.450	53.624
AIII	75.96	2.920	70.221	81.697
LI	19.13	0.164	18.805	19.448
LII	29.60	1.681	26.299	32.906
LIII	49.22	6.101	37.233	61.214
KI	0.93	0.046	0.843	1.023
KII	0.82	0.026	0.769	0.870
KIII	0.32	0.009	0.301	0.337

Quadro A.I.17- Ensaio EI.2 (450h) quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	81.3619	6.7802
Resíduo	438	0.2949	0.0007
Total (não corrigido)	450	81.6568	
Total (corrigido)	449	40.3329	

$$r^2 = 0.993$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	15.17	1.173	12.868	17.480
AII	46.47	4.352	37.913	55.022
AIII	62.70	5.551	51.789	73.609
AIV	29.18	10.922	7.719	50.651
LI	18.84	0.107	18.627	19.048
LII	30.36	1.429	27.553	33.172
LIII	62.61	7.665	47.549	77.680
LIV	268.35	35.735	198.115	338.581
KI	1.00	0.044	0.914	1.086
KII	0.86	0.040	0.786	0.943
KIII	0.35	0.012	0.328	0.377
KIV	0.07	0.005	0.060	0.078

Quadro A.I.18- Ensaio EI.3 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	110.5767	12.2863
Resíduo	181	0.1509	0.0008
Total (não corrigido)	190	110.7276	
Total (corrigido)	189	33.7096	

$$r^2 = 0.996$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	18.17	0.690	16.808	19.530
AII	61.38	1.457	58.502	64.253
AIII	68.77	2.829	63.192	74.355
LI	17.75	0.130	17.499	18.010
LII	38.41	0.412	37.594	39.218
LIII	55.78	4.350	47.196	64.362
KI	0.97	0.016	0.941	1.004
KII	1.28	0.016	1.252	1.314
KIII	0.32	0.006	0.307	0.330

Quadro A.I.19- Ensaio EI.3 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	110.6231	9.2186
Resíduo	178	0.1045	0.0006
Total (não corrigido)	190	110.7276	
Total (corrigido)	189	33.7096	

$$r^2 = 0.997$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	22.61	0.979	20.674	24.537
AII	53.64	2.294	49.115	58.171
AIII	65.76	4.026	57.816	73.706
AIV	7.80	2.543	2.787	12.822
LI	17.86	0.113	17.638	18.083
LII	40.71	0.371	39.982	41.445
LIII	69.04	7.098	55.028	83.042
LIV	71.69	2.787	66.192	77.192
KI	1.06	0.019	1.020	1.094
KII	1.32	0.021	1.278	1.361
KIII	0.31	0.008	0.293	0.325
KIV	0.18	0.042	0.099	0.264

Quadro A.I.20- Ensaio EI.4 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	98.8742	10.9860
Resíduo	216	0.1597	0.0007
Total (não corrigido)	225	99.0339	
Total (corrigido)	224	21.3748	

$$r^2 = 0.993$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	20.96	1.171	18.655	23.272
AII	42.81	10.982	21.163	64.455
AIII	83.84	11.066	62.030	105.654
LI	16.76	0.094	16.571	16.940
LII	29.28	2.129	25.080	33.473
LIII	63.71	13.088	37.916	89.510
KI	1.34	0.042	1.258	1.426
KII	0.67	0.099	0.475	0.863
KIII	0.50	0.041	0.417	0.579

Quadro A.I.21- Ensaio El.4 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	98.9007	8.2417
Resíduo	213	0.1332	0.0006
Total (não corrigido)	225	99.0339	
Total (corrigido)	224	21.3748	

$$r^2 = 0.994$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	25.01	3.112	18.877	31.146
AII	38.91	16.473	6.438	71.379
AIII	79.55	10.147	59.551	99.553
AIV	4.09	5.371	-6.498	14.675
LI	16.73	0.112	16.512	16.951
LII	37.57	9.798	18.257	56.884
LIII	69.31	11.731	46.183	92.432
LIV	34.57	2.084	30.464	38.679
KI	1.49	0.113	1.270	1.716
KII	0.62	0.152	0.316	0.916
KIII	0.48	0.046	0.387	0.568
KIV	0.20	0.196	-0.183	0.588

Quadro A.I.22- Ensaio El.5 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	78.7343	8.7483
Resíduo	251	0.2008	0.0008
Total (não corrigido)	260	78.9350	
Total (corrigido)	259	16.6602	

$$r^2 = 0.988$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	16.22	1.838	12.598	19.840
AII	19.07	4.968	9.283	28.851
AIII	99.03	3.937	91.279	106.785
LI	13.28	0.142	13.002	13.563
LII	21.88	3.948	14.107	29.657
LIII	52.92	4.299	44.450	61.383
KI	1.07	0.076	0.922	1.222
KII	0.40	0.053	0.300	0.510
KIII	0.63	0.013	0.609	0.659

Quadro A.I.23- Ensaio EI.5 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	78.7709	6.5642
Resíduo	248	0.1641	0.0007
Total (não corrigido)	260	78.9350	
Total (corrigido)	259	16.6602	

$$r^2 = 0.990$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	17.09	1.113	14.894	19.279
AII	25.94	3.949	18.163	33.718
AIII	87.85	4.071	79.828	95.865
AIV	3.70	1.604	0.537	6.855
LI	13.22	0.122	12.984	13.463
LII	22.72	1.914	18.955	26.494
LIII	63.61	4.106	55.520	71.694
LIV	220.85	5.106	210.796	230.910
KI	1.09	0.042	1.009	1.175
KII	0.49	0.037	0.414	0.558
KIII	0.62	0.012	0.595	0.644
KIV	0.05	0.007	0.034	0.063

Quadro A.I.24- Ensaio EII.1 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	400.3592	44.4844
Resíduo	202	3.9556	0.0196
Total (não corrigido)	211	404.3148	
Total (corrigido)	210	229.9646	

$$r^2 = 0.983$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.32	0.363	-0.398	1.034
AII	66.39	5.297	55.946	76.833
AIII	115.38	6.036	103.474	127.277
LI	8.07	0.682	6.723	9.412
LII	17.81	0.300	17.217	18.398
LIII	22.57	2.194	18.248	26.901
KI	0.17	0.187	-0.194	0.543
KII	3.00	0.139	2.724	3.273
KIII	1.58	0.078	1.422	1.731

Quadro A.I.25- Ensaio EII.1 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	403.1571	33.5964
Resíduo	199	1.1577	0.0058
Total (não corrigido)	211	404.3148	
Total (corrigido)	210	229.9646	

$$r^2 = 0.995$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.48	0.341	-0.192	1.154
AII	41.45	4.123	33.320	49.582
AIII	107.57	10.267	87.326	127.818
AIV	51.94	9.178	33.837	70.034
LI	7.99	0.566	6.871	9.105
LII	18.05	0.249	17.564	18.545
LIII	21.12	1.521	18.121	24.118
LIV	38.60	20.225	-1.278	78.486
KI	0.18	0.078	0.027	0.333
KII	2.51	0.153	2.205	2.810
KIII	2.11	0.140	1.834	2.387
KIV	0.29	0.033	0.227	0.355

Quadro A.I.26- Ensaio EII.2 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	409.2305	45.4701
Resíduo	127	1.6765	0.0132
Total (não corrigido)	136	410.9070	
Total (corrigido)	135	177.0321	

$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	16.72	462286.705	-914765.244	914798.680
AII	51.43	3.324	44.849	58.005
AIII	126.62	3.946	118.815	134.433
LI	8.12	54.760	-100.236	116.483
LII	16.14	0.204	15.737	16.546
LIII	20.83	1.232	18.396	23.272
KI	61.11	1904909.729	-3769411.470	3769533.697
KII	2.99	0.109	2.775	3.206
KIII	2.01	0.054	1.904	2.117

Quadro A.I.27- Ensaio EII.2 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	410.2203	34.1850
Resíduo	124	0.6866	0.0055
Total (não corrigido)	136	410.9070	
Total (corrigido)	135	177.0321	

$$r^2 = 0.996$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	1.08	0.733	-0.374	2.528
AII	50.25	6.460	37.460	63.034
AIII	112.14	11.773	88.837	135.442
AIV	23.64	9.343	5.143	42.130
LI	6.95	0.579	5.802	8.093
LII	15.89	0.218	15.460	16.324
LIII	22.87	2.507	17.909	27.832
LIV	71.91	15.941	40.362	103.466
KI	0.26	0.097	0.067	0.450
KII	3.10	0.270	2.569	3.640
KIII	2.17	0.080	2.015	2.331
KIV	0.26	0.050	0.158	0.354

Quadro A.I.28- Ensaio EII.3 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	326.0991	36.2332
Resíduo	100	0.9117	0.0091
Total (não corrigido)	109	327.0108	
Total (corrigido)	108	95.6663	

$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	1.04	0.419	0.204	1.866
AII	69.35	5.015	59.400	79.298
AIII	109.04	6.819	95.512	122.570
LI	6.61	0.463	5.692	7.530
LII	17.67	0.225	17.220	18.111
LIII	28.96	3.576	21.870	36.060
KI	0.34	0.092	0.157	0.522
KII	3.05	0.130	2.788	3.306
KIII	1.28	0.035	1.214	1.355

Quadro A.I.29- Ensaio Ell.3 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	326.2781	27.1898
Resíduo	97	0.7328	0.0076
Total (não corrigido)	109	327.0108	
Total (corrigido)	108	95.6663	

$$r^2 = 0.992$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	1.77	1.119	-0.446	3.995
AII	64.36	44.890	-24.738	153.449
AIII	70.18	76.776	-82.196	222.562
AIV	39.22	36.269	-32.766	111.203
LI	6.33	0.434	5.473	7.196
LII	17.34	0.522	16.301	18.374
LIII	28.16	22.492	-16.485	72.796
LIV	65.84	13.358	39.331	92.355
KI	0.40	0.125	0.155	0.652
KII	3.06	1.578	-0.073	6.191
KIII	1.37	0.581	0.214	2.519
KIV	0.59	0.483	-0.364	1.554

Quadro A.I.30- Ensaio Ell.4 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	334.3493	37.1499
Resíduo	174	1.2741	0.0073
Total (não corrigido)	183	335.6234	
Total (corrigido)	182	153.0911	

$$r^2 = 0.992$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.68	0.258	0.175	1.192
AII	68.56	4.588	59.508	77.617
AIII	113.80	5.334	103.277	124.332
LI	3.80	0.397	3.017	4.584
LII	15.72	0.203	15.322	16.122
LIII	27.91	2.790	22.399	33.413
KI	0.33	0.117	0.103	0.565
KII	2.87	0.109	2.659	3.089
KIII	1.35	0.036	1.283	1.426

Quadro A.I.31- Ensaio Ell.4 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	334.7050	27.8921
Resíduo	171	0.9184	0.0054
Total (não corrigido)	183	335.6234	
Total (corrigido)	182	153.0911	

$$r^2 = 0.994$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.94	0.231	0.483	1.394
AII	73.19	6.118	61.113	85.268
AIII	104.96	7.933	89.305	120.624
AIV	13.32	9.919	-6.264	32.895
LI	3.49	0.317	2.868	4.118
LII	15.57	0.149	15.277	15.865
LIII	31.60	3.847	24.002	39.189
LIV	139.46	9.976	119.773	159.156
KI	0.34	0.069	0.209	0.479
KII	3.02	0.150	2.723	3.316
KIII	1.36	0.035	1.290	1.428
KIV	0.12	0.025	0.073	0.172

Quadro A.I.32- Ensaio Ell.5 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	354.4307	39.3812
Resíduo	134	1.8568	0.0139
Total (não corrigido)	143	356.2874	
Total (corrigido)	142	136.3502	

$$r^2 = 0.986$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.67	0.318	0.043	1.302
AII	58.46	4.470	49.624	67.305
AIII	123.53	5.288	113.068	133.984
LI	9.16	0.413	8.345	9.980
LII	22.93	0.258	22.419	23.439
LIII	31.54	2.182	27.223	35.854
KI	0.30	0.118	0.066	0.532
KII	2.78	0.119	2.549	3.020
KIII	1.63	0.049	1.529	1.721

Quadro A.I.33- Ensaio EII.5 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	355.0771	29.5898
Resíduo	131	1.2103	0.0092
Total (não corrigido)	143	356.2874	
Total (corrigido)	142	136.3502	

$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	1.00	0.420	0.168	1.831
AII	46.53	14.748	17.360	75.709
AIII	57.49	52.208	-45.785	160.773
AIV	82.36	41.597	0.066	164.644
LI	9.03	0.435	8.167	9.886
LII	22.57	0.321	21.936	23.207
LIII	29.11	7.910	13.466	44.762
LIV	40.25	18.775	3.111	77.393
KI	0.33	0.096	0.140	0.519
KII	2.60	0.596	1.423	3.781
KIII	1.33	0.872	-0.391	3.059
KIV	0.90	0.443	0.019	1.772

Quadro A.I.34- Ensaio EII.6 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	281.5734	31.2859
Resíduo	102	0.1481	0.0015
Total (não corrigido)	111	281.7214	
Total (corrigido)	110	82.0541	

$$r^2 = 0.998$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	0.80	0.309	0.189	1.415
AII	87.16	8.502	70.300	104.028
AIII	79.36	10.350	58.827	99.885
LI	0.99	0.812	-0.624	2.596
LII	17.74	0.163	17.422	18.065
LIII	34.84	7.127	20.702	48.973
KI	0.13	0.031	0.064	0.189
KII	2.71	0.177	2.358	3.058
KIII	0.89	0.054	0.784	1.000

Quadro A.I.35- Ensaio EII.6 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	281.6999	23.4750
Resíduo	99	0.0215	0.0002
Total (não corrigido)	111	281.7214	
Total (corrigido)	110	82.0541	

$$r^2 = 0.9997$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	72.71	29.042	15.086	130.337
AII	62.23	21.931	18.715	105.747
AIII	4.23	1.027	2.188	6.264
AIV	39.95	62.520	-82.121	162.017
LI	20.68	5.591	9.582	31.770
LII	17.84	0.216	17.414	18.271
LIII	34.76	0.260	34.244	35.277
LIV	30.94	23.265	-15.223	77.104
KI	0.53	0.446	-0.358	1.410
KII	2.37	0.660	1.061	3.681
KIII	0.33	0.051	0.228	0.431
KIV	0.70	0.714	-0.720	2.112

Quadro A.I.36- Ensaio E.A duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	475.1828	79.1971
Resíduo	218	3.3917	0.0156
Total (não corrigido)	224	478.5745	
Total (corrigido)	223	289.8542	

$$r^2 = 0.988$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AII	59.64	3.003	53.722	65.560
AIII	132.41	3.597	125.324	139.502
LII	16.28	0.161	15.962	16.597
LIII	22.52	1.148	20.254	24.778
KII	3.60	0.100	3.399	3.793
KIII	2.07	0.046	1.977	2.157

Quadro A.I.37- Ensaio E.A três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	477.9655	53.1073
Resíduo	215	0.6090	0.0028
Total (não corrigido)	224	478.5745	
Total (corrigido)	223	289.8542	

$$r^2 = 0.998$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AII	60.51	3.209	54.187	66.838
AIII	113.01	10.050	93.204	132.821
AIV	42.14	9.581	23.253	61.022
LII	16.08	0.083	15.916	16.244
LIII	24.55	1.525	21.539	27.553
LIV	54.65	29.549	-3.588	112.898
KII	3.74	0.123	3.502	3.988
KIII	2.10	0.100	1.904	2.297
KIV	0.21	0.019	0.174	0.249

Quadro A.I.38- Ensaio E.B duas populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	6	506.3291	84.3882
Resíduo	174	3.3536	0.0193
Total (não corrigido)	180	509.6827	
Total (corrigido)	179	307.2067	

$$r^2 = 0.989$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AII	67.23	4.830	57.696	76.760
AIII	114.86	5.399	104.201	125.512
LII	18.51	0.172	18.173	18.853
LIII	25.52	1.668	22.229	28.815
KII	4.06	0.166	3.729	4.386
KIII	2.09	0.075	1.940	2.237

Quadro A.I.39- Ensaio E.B três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	508.6802	56.5200
Resíduo	171	1.0025	0.0059
Total (não corrigido)	180	509.6827	
Total (corrigido)	179	307.2067	

$$r^2 = 0.989$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AII	59.76	6.845	46.246	73.269
AIII	95.33	19.652	56.541	134.126
AIV	40.02	14.752	10.904	69.145
LII	18.37	0.116	18.138	18.594
LIII	25.66	2.456	20.807	30.504
LIV	43.71	24.020	-3.698	91.128
KII	4.03	0.307	3.422	4.635
KIII	2.28	0.281	1.724	2.833
KIV	0.35	0.098	0.153	0.540

Quadro A.I.40- Ensaio EIII.1 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	261.8364	29.0929
Resíduo	172	1.0257	0.0060
Total (não corrigido)	181	262.8620	
Total (corrigido)	180	111.5437	

$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	19.75	1.323	17.142	22.363
AII	54.74	3.908	47.023	62.452
AIII	92.84	4.319	84.312	101.363
LI	16.74	0.147	16.447	17.027
LII	30.13	0.538	29.067	31.191
LIII	32.26	2.260	27.804	36.724
KI	1.76	0.057	1.651	1.875
KII	1.83	0.077	1.674	1.978
KIII	1.01	0.053	0.907	1.115

Quadro A.I.41- Ensaio EIII.1 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	262.4092	21.8674
Resíduo	169	0.4529	0.0027
Total (não corrigido)	181	262.8620	
Total (corrigido)	180	111.5437	

$$r^2 = 0.996$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	28.43	1.316	25.831	31.027
AII	48.39	9.533	29.565	67.205
AIII	53.18	14.215	25.117	81.240
AIV	46.00	6.964	32.252	59.748
LI	16.68	0.094	16.495	16.866
LII	31.72	0.254	31.222	32.226
LIII	45.71	5.094	35.653	55.766
LIV	51.43	11.786	28.162	74.695
KI	2.04	0.040	1.960	2.117
KII	2.11	0.262	1.595	2.631
KIII	1.09	0.187	0.725	1.463
KIV	0.31	0.059	0.192	0.424

Quadro A.I.42- Ensaio EIII.2 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	208.7770	23.1974
Resíduo	156	1.3178	0.0084
Total (não corrigido)	165	210.0948	
Total (corrigido)	164	71.7340	

$$r^2 = 0.982$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	28.97	3.401	22.249	35.685
AII	56.94	6.564	43.976	69.909
AIII	76.14	7.613	61.105	91.179
LI	16.30	0.272	15.767	16.841
LII	32.05	1.257	29.571	34.536
LIII	41.44	7.576	26.478	56.407
KI	1.69	0.086	1.516	1.857
KII	1.64	0.111	1.417	1.854
KIII	0.65	0.048	0.554	0.745

Quadro A.I.43- Ensaio EIII.2 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	208.9001	17.4083
Resíduo	153	1.1948	0.0078
Total (não corrigido)	165	210.0948	
Total (corrigido)	164	71.7340	

$$r^2 = 0.983$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	34.44	3.434	27.659	41.229
AII	42.76	22.680	-2.042	87.571
AIII	76.12	9.269	57.811	94.436
AIV	8.37	17.121	-25.454	42.195
LI	16.67	0.254	16.167	17.171
LII	37.70	8.024	21.846	53.549
LIII	42.39	8.677	25.244	59.527
LIV	31.88	0.866	30.174	33.596
KI	1.84	0.088	1.665	2.012
KII	1.34	0.506	0.342	2.342
KIII	0.66	0.068	0.527	0.795
KIV	0.60	0.892	-1.157	2.366

Quadro A.I.44- Ensaio EIII.3 três populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	9	285.0587	31.6732
Resíduo	149	0.8887	0.0060
Total (não corrigido)	158	285.9474	
Total (corrigido)	157	94.5038	

$$r^2 = 0.991$$

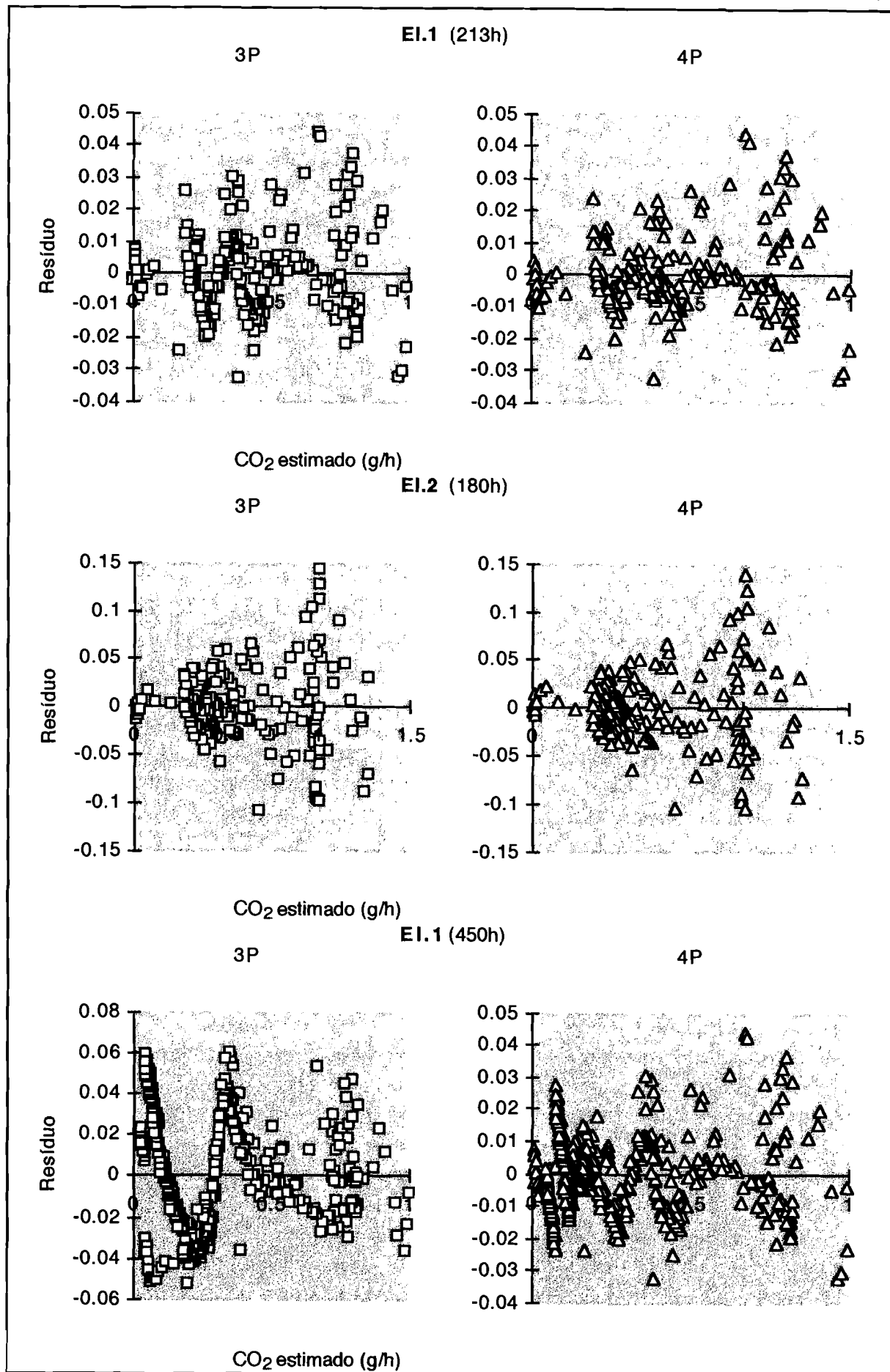
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	20.35	0.846	18.679	22.022
AII	90.72	8.582	73.764	107.682
AIII	73.97	9.518	55.166	92.780
LI	15.35	0.094	15.161	15.532
LII	29.02	0.363	28.299	29.735
LIII	55.36	8.339	38.878	71.834
KI	2.12	0.043	2.033	2.202
KII	2.50	0.123	2.255	2.742
KIII	0.74	0.044	0.654	0.827

Quadro A.I.45- Ensaio EIII.3 quatro populações

	GL	SQ	MSQ
Regressão	12	285.0947	23.7579
Resíduo	146	0.8527	0.0058
Total (não corrigido)	158	285.9474	
Total (corrigido)	157	94.5038	

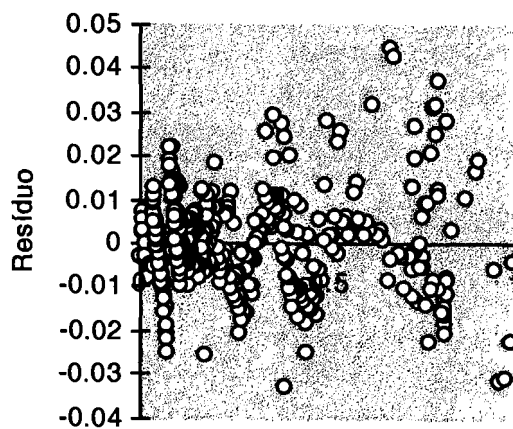
$$r^2 = 0.991$$

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão assintótico	Intervalo de confiança assintótico (95%)	
			limite inferior	limite superior
AI	19.28	1.046	17.212	21.345
AII	106.59	10.144	86.541	126.637
AIII	25.87	205.983	-381.226	432.962
AIV	35.76	230.335	-419.456	490.986
LI	15.35	0.094	15.164	15.536
LII	28.92	0.480	27.969	29.868
LIII	68.56	3.153	62.331	74.793
LIV	87.80	309.085	-523.061	698.656
KI	2.07	0.055	1.964	2.180
KII	2.67	0.109	2.451	2.884
KIII	0.47	3.044	-5.545	6.486
KIV	0.34	1.706	-3.034	3.710



(continua)

El.1 (450h)
5P

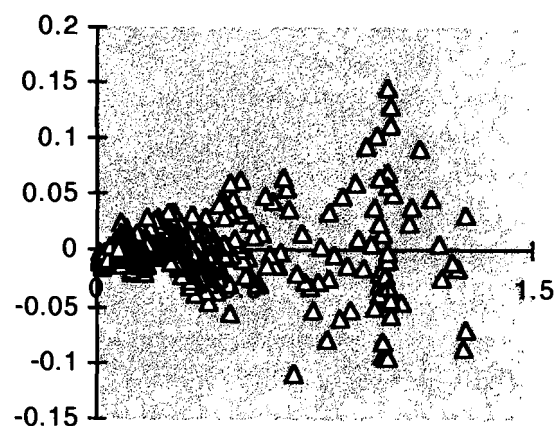
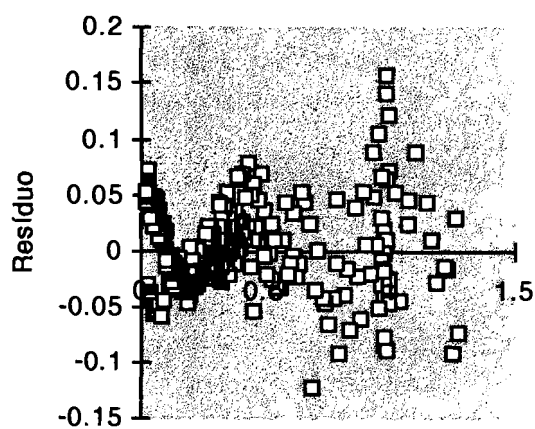


CO₂ estimado (g/h)

El.2 (450h)

3P

4P

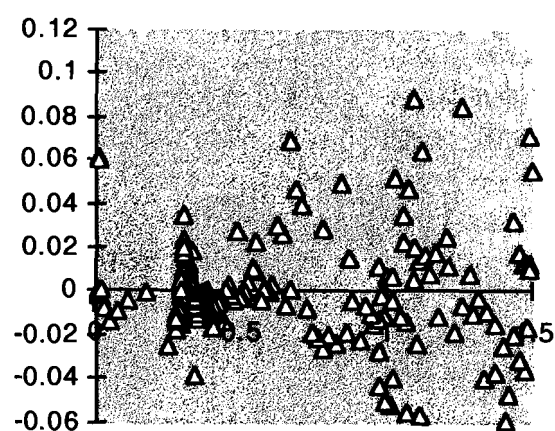
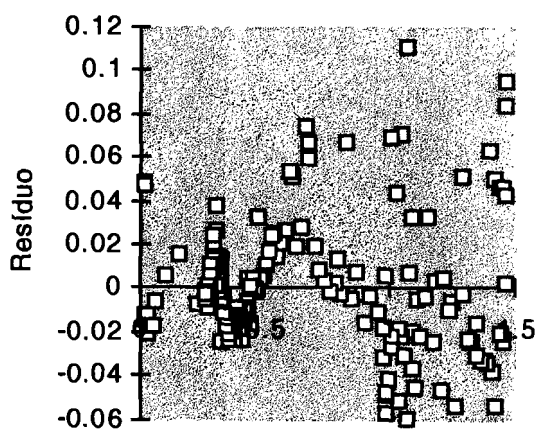


CO₂ estimado (g/h)

El.3

3P

4P



CO₂ estimado (g/h)

(continua)

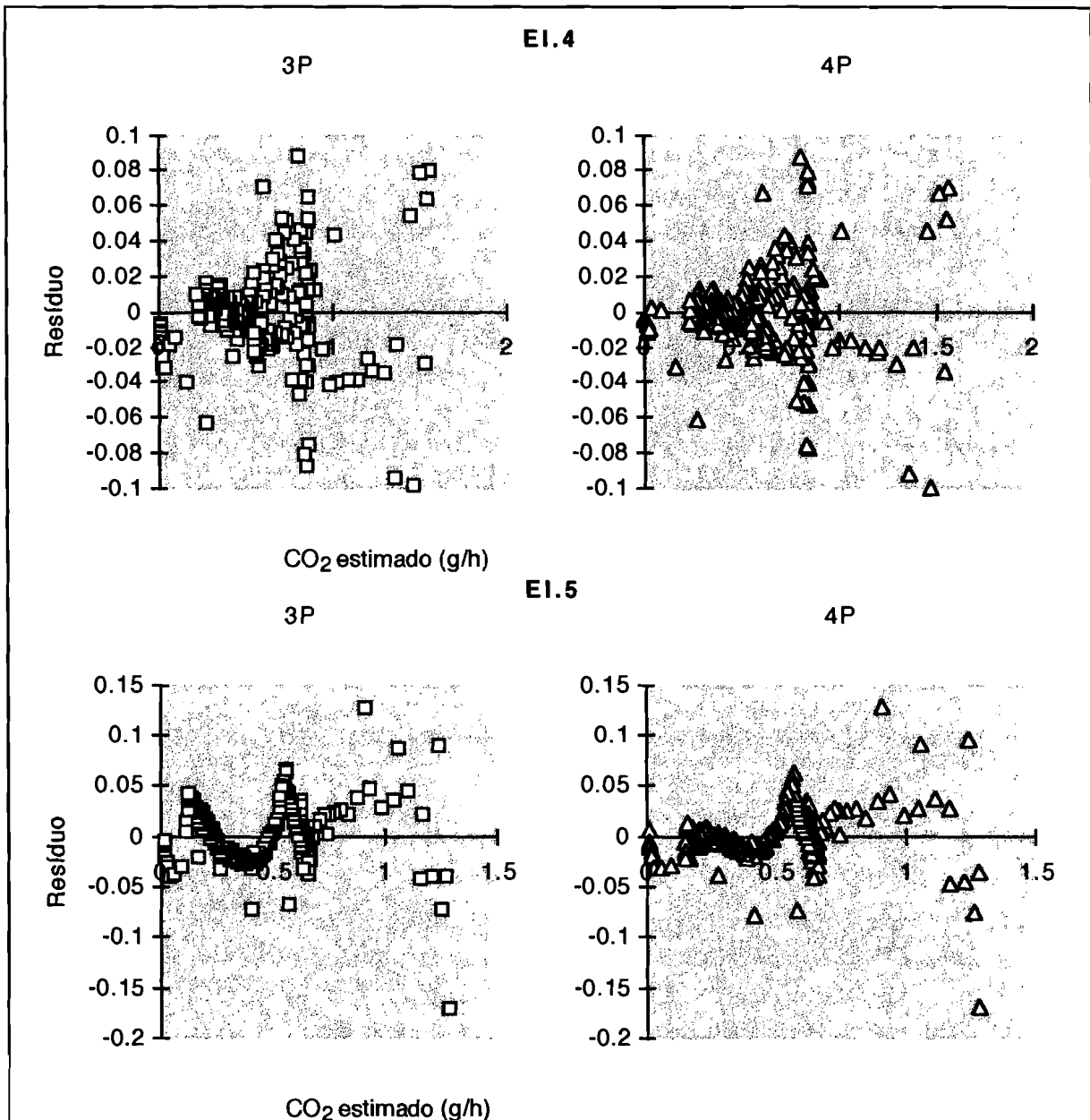
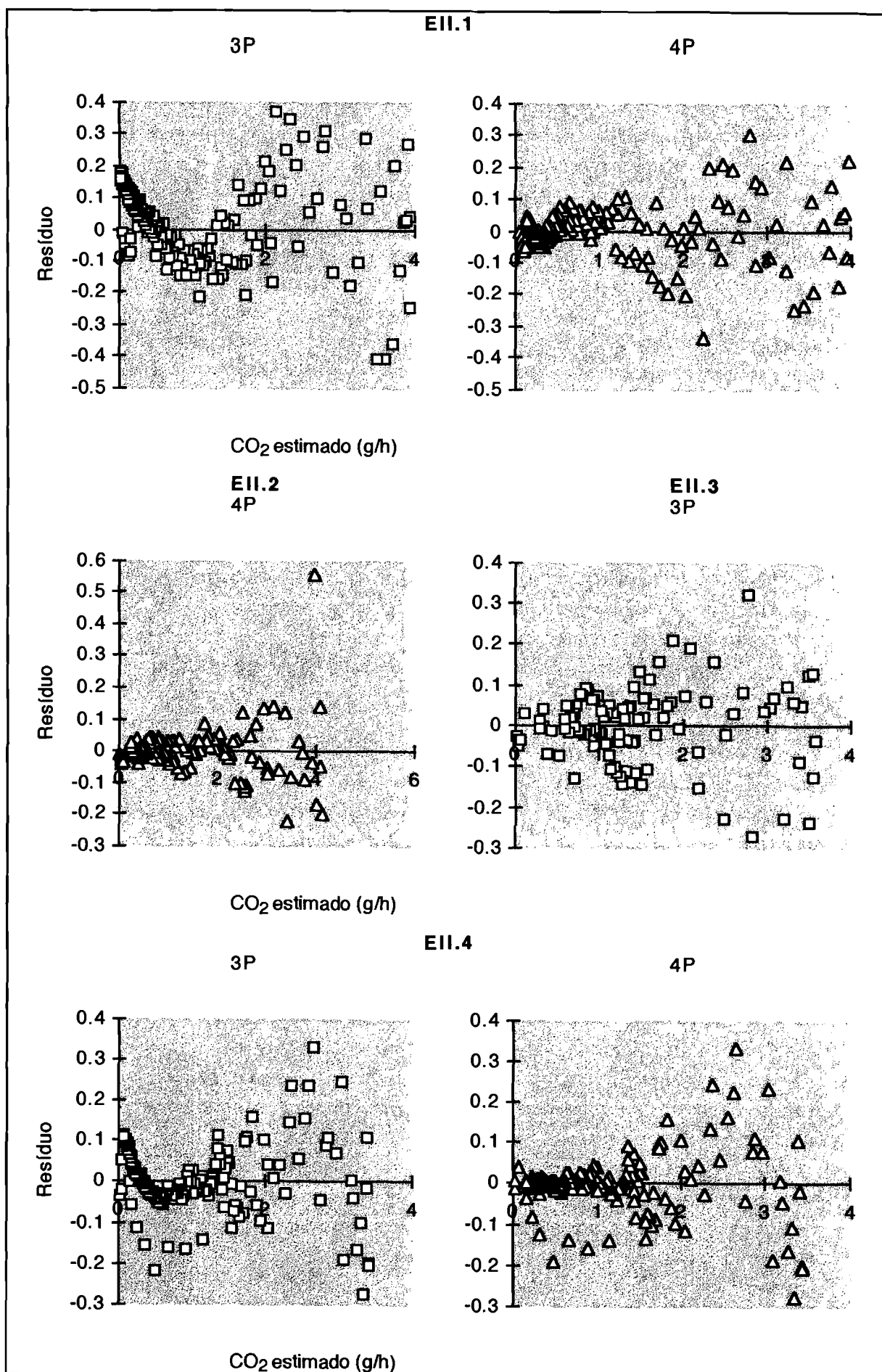
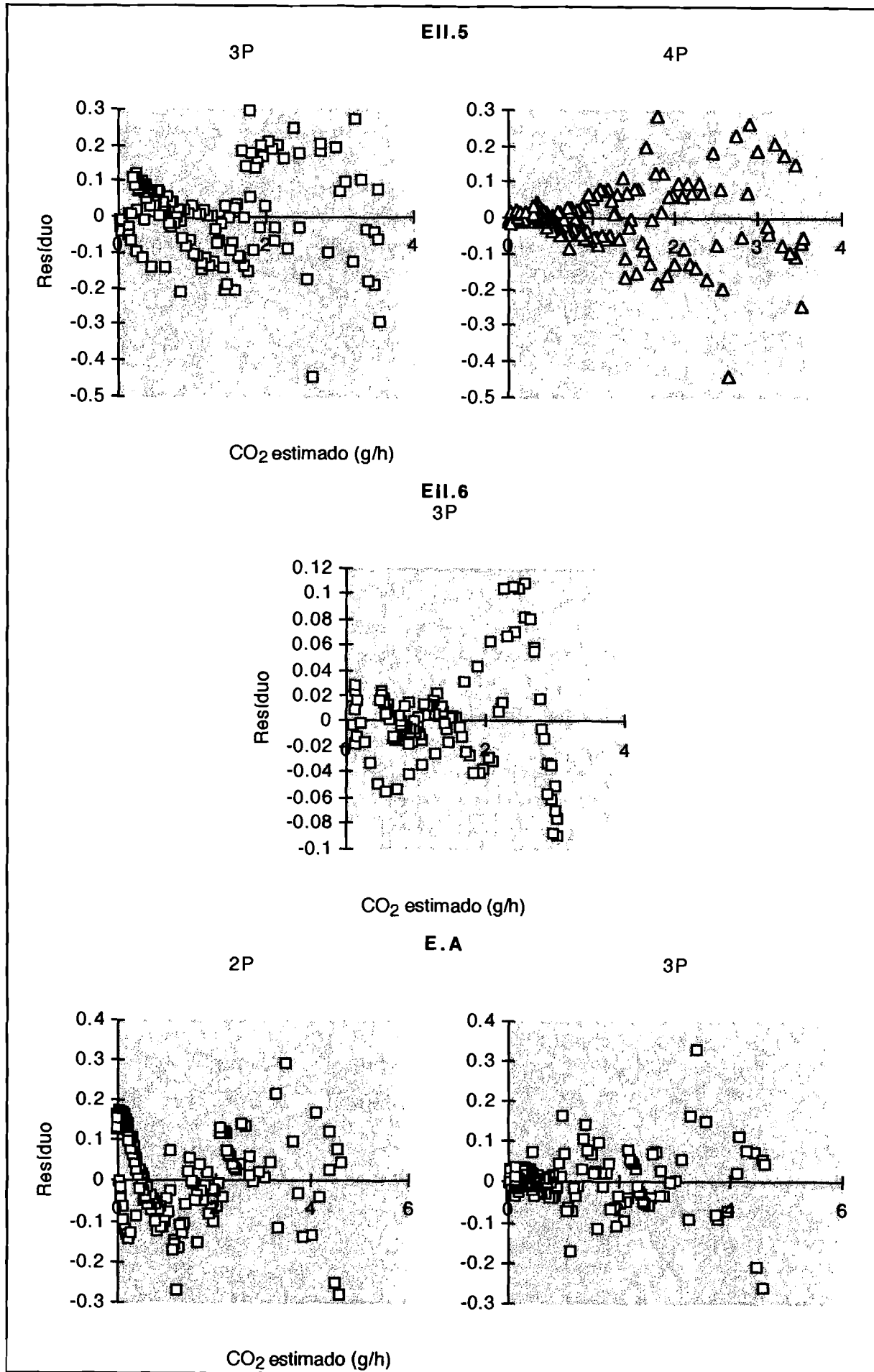


Figura A.II.1- Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO₂-
ensaios a 25°C



(continua)



(continua)

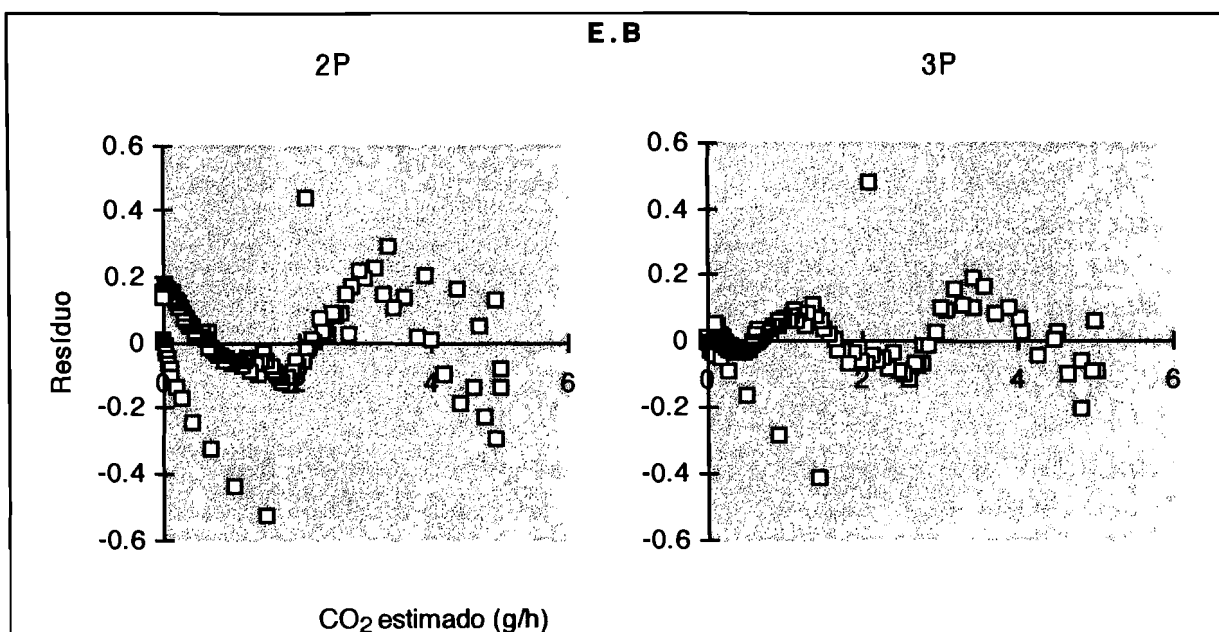


Figura A.II.2- Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO₂-
ensaios a 40°C

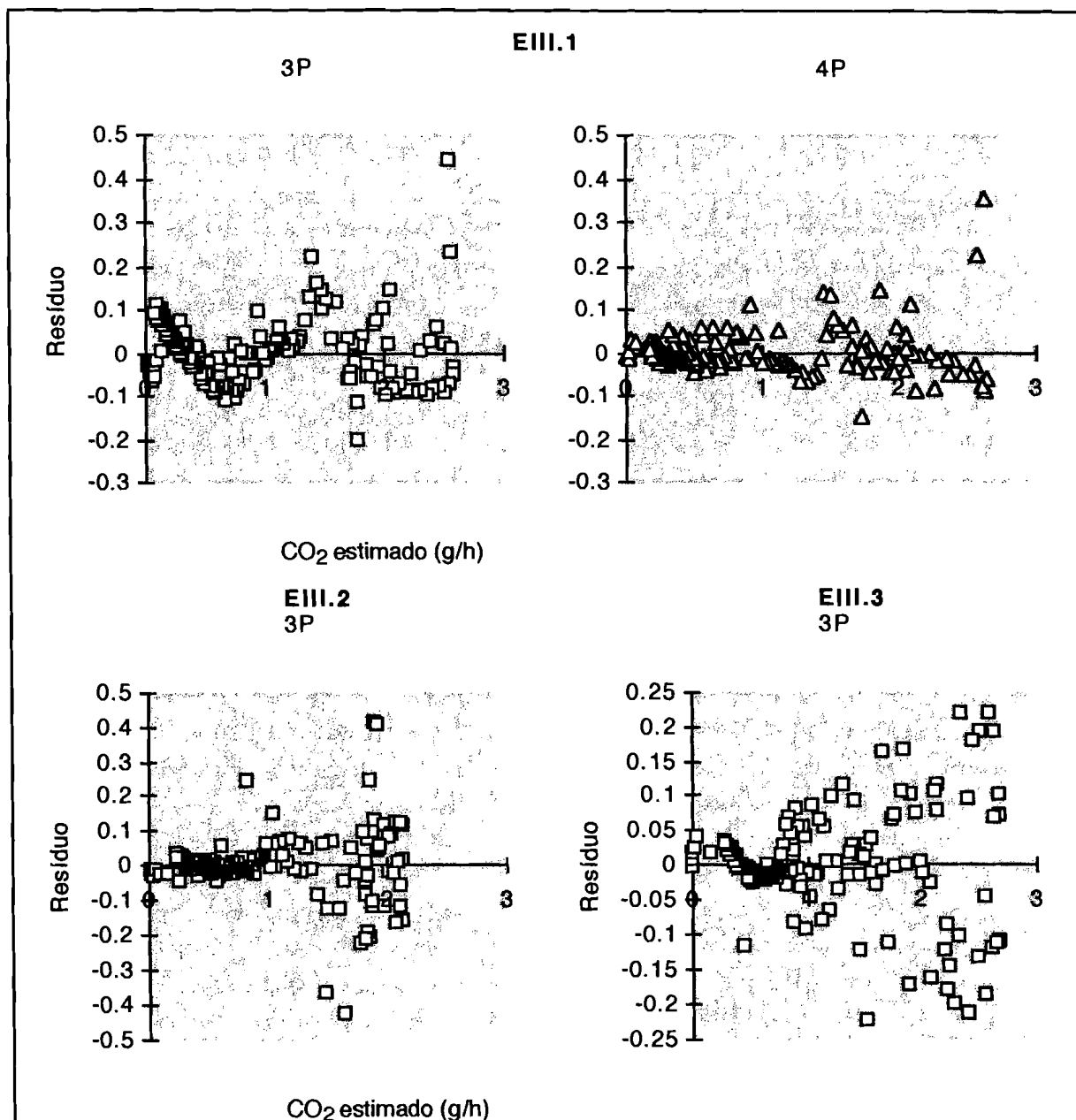


Figura A.II.3- Distribuição do resíduo em função da taxa de produção de CO₂-
ensaios a 25-40°C

Quadro A.II.1- Balanço de nutrientes

Ensaio	Tempo (h)	CO ₂ ac (g Carbono)	RPS		RSV		Rcarbono		Razoto		C/N
			(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	
E.B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37.3
	36	21.9	55.0	15.4	53.4	17.2	23.6	15.5	0.0	0.0	30.3
	65	39.6	77.8	21.8	75.9	24.4	37.7	24.6	0.2	5.3	29.6
	88	45.6	88.9	24.9	88.0	28.3	43.6	28.5	0.2	5.3	28.1
	180	52.0	103.5	29.0	101.5	32.7	51.8	33.9	0.6	13.5	28.4
	180	55.2	106.4	29.8	104.6	33.7	52.1	34.1	0.6	14.3	28.6

Quadro A.II.2- Redução do substrato(*)

Ensaio	Tempo	RPS		RSV		RA		RH		RC		RL		CO ₂ ac RSV	RA+RH
	(h)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)		(g)
EI.3 (25°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	15	4.3	1.2	8.2	2.7	6.8	9.3	0	0					0.1	6.8
	23	11.0	3.1	11.2	3.6	6.2	8.5	0	0					0.7	6.2
	46	27.9	7.9	28.6	9.3	25.4	34.6	9.9	9.6					1.2	35.3
	94	58.0	16.5	59.1	19.1	60.3	82.4	32.4	31.2					1.5	92.7
	161	72.8	20.7	74.3	24.0	65.4	89.3	43.5	41.9	0		0.2		1.5	108.9
	190	77.4	22.0	80.1	25.9	66.1	90.2	45.6	43.9					1.5	111.7
EI.4 (25°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	33	22.6	6.3	22.6	7.3	16.2	21.0	4.3	4.6					1.1	20.5
	60	30.7	8.6	31.1	10.0	25.2	32.6	19.8	21.2					1.6	45.0
	88	40.1	11.3	41.6	13.4	41.3	53.4	22.2	23.8					1.7	63.5
	225	75.6	21.2	76.7	24.6	67.3	87.1	31.5	33.7					1.7	98.8
	225	79.6	22.3	81.3	26.1	68.5	88.5	29.5	31.6	0		1.1		1.6	98.0
	225	78.9	22.1	79.5	25.5	68.2	88.2	33.1	35.4					1.7	101.3
EII.4 (40°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	11	0	0	0	0	2.4	3.4	0	0					-	2.4
	19	0	0	2.7	0.9	5.3	7.7	10.7	11.6					-	16.0
	39	43.5	12.5	46.6	15.3	50.8	73.6	27.0	29.1					1.5	77.8
	64	61.5	17.6	66.4	21.8	61.7	89.3	25.3	27.3					1.7	87.0
	183	103.2	29.6	104.8	34.4	65.8	95.3	40.5	43.8	23.4	31.2	11.5	31.2	1.8	106.3
	183	101.7	29.2	104.5	34.3	66.1	95.7							1.7	
EIII.1 (25-40°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	37	32.0	8.9	32.4	10.3	29.0	40.0	30.7	26.1					1.4	59.7
	66	64.0	17.7	64.6	20.6	55.1	76.0	47.0	39.9					1.6	102.1
	137	88.6	24.6	89.3	28.4	66.5	91.7	56.6	48.1	0		10.1		1.7	123.1
	181	101.1	28.0	101.9	32.4	66.3	91.4	60.6	51.5					1.6	126.9
	181	100.0	27.7			68.5	94.5								
EIII.3 (25-40°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	18	14.6	4.1	13.8	4.4	13.0	17.3	0	0					0.5	13.0
	39	30.2	8.4	29.5	9.5	31.4	41.9	38.3	33.4					1.6	69.7
	62	57.5	16.1	57.7	18.5	60.4	80.5	44.0	38.4					1.8	104.4
	160	92.7	25.9	92.5	29.7	69.5	92.6	55.8	48.7	0		0		1.9	125.3
	160	100.7	28.2	100.2	32.2	70.7	94.2	57.5	50.1	0		0		1.8	128.2
EII.7 (40°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	163	147.5	37.4	147.7	42.3	99.4	97.6	56.0	47.8	0	0	0	0	1.6	155.4
	163	155.9	39.5	154.2	44.1	98.8	97.0	64.9	55.4					1.5	163.7
	163	146.1	37.0	147.0	42.1	98.8	97.0	58.0	49.5	6.2	7.6	0	0	1.6	156.8
	163	140.6	35.6	141.2	40.4	98.9	97.1	58.2	49.7					1.7	157.1
E.A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
	9	4.1	1.2	4.7	1.5	6.2	7.9	4.8	4.4					0.1	11.0
	29	45.3	12.8	47.7	15.3	56.8	72.8	43.0	39.4					1.2	99.8
	224	117.2	33.1	104.2	33.4	74.8	95.9	55.3	50.7					-	130.1
	224	118.2	33.3	119.5	38.3	74.2	95.1	57.7	52.9	13.7	16.3	0	0	1.7	131.9

(*) A redução de peso seco (RPS), de sólidos voláteis (RSV), de amido (RA), de hemicelulose (RH), de celulose (RC) ou de lenhina (RL) foi calculada com base nos resultados do quadro 5.3 e é a diferença entre o momento t=0h e o momento t expressa em gramas ou em percentagem do valor inicial